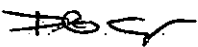


PREVISÃO DE CHEIAS COM EXTENSÃO DE
REGISTROS ATRAVÉS DE MODELOS DETERMINÍSTICOS


KLAUDIUS DA ROCHA DIB

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

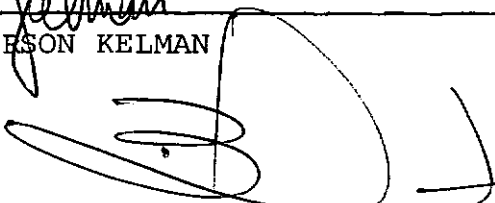
Aprovado por:



PAULO CANEDO DE MAGALHÃES (Presidente)



JERSON KELMAN



BENEDITO PINTO FERREIRA BRAGA JUNIOR

DIB, KLAUDIUS DA ROCHA

Previsão de Cheias com Extensão de Registros através
de Modelos Determinísticos (Rio de Janeiro) 1983.

VIII, 133 p.29,7 cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia Ci
vil, 1983)

Tese - Univ. Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ 1.
Previsão de Cheias I. COPPE/UFRJ II. TÍTULO (série)

"Para as pessoas que inventaram
as suas próprias leis
quando sabem ter razão;
para as que têm um prazer especial
em fazer coisas bem feitas,
nem que seja sô para elas;
para as que sabem que a vida
é algo mais do que aquilo
que nossos olhos vêem".

(Apresentação da EDITORIAL NÓRDICA LTDA
para o livro "FERNÃO CAPELO GAIVOTA")

A KALIM E ELDA,
pela criação e formação

A JOSÉ E CONSUELO,
pelo incentivo

A FÁTIMA,
pelo exemplo
pelo amor

AGRADECIMENTOS

A Paulo Canedo de Magalhães, pela sugestão do tema e segura orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores da COPPE/UFRJ, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos professores Jerson Kelman e Benedito P.F. Braga Junior, pela leitura do trabalho e participação na banca examinadora.

A Sonia Maria Lopes de Moraes e Celma da Cunha Ramos da secretaria do programa de Engenharia Civil da COPPE, pelo apoio prestado durante o desenvolvimento do mestrado.

Ao CNPQ, pelo auxílio financeiro.

A Biblioteca Central do Centro Tecnológico da UFRJ, pelo apoio prestado durante a pesquisa bibliográfica.

Ao Núcleo de Computação Eletrônica da UFRJ, pela ajuda no desenvolvimento dos programas computacionais.

Às Chefias do Departamento de Operação Energética e da Divisão de Estudos de Operação, da Diretoria de Operação de Sistemas da ELETROBRÁS, que possibilitaram o apoio necessário à continuação do desenvolvimento deste trabalho como parte de minhas funções.

Aos colegas do DEOP/ELETROBRÁS, pelo incentivo, e em particular a Paulo Roberto de Holanda Sales e Tristão de Alencar Araripe Neto, pelas valiosas contribuições e estímulo.

A Ricardo dos Santos Mattos, pela cuidadosa elaboração dos desenhos necessários.

A Elzira Aguiar B. do Nascimento, Cleide Pereira Bagundes e Helvia Carvalho Pessanha, pelo excelente trabalho de datilografia e revisão.

A todas outras pessoas que direta ou indiretamente tenham contribuído para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os custos, formas e dimensões das estruturas de qualquer projeto hidráulico são fortemente influenciados pelo valor da descarga selecionada como a "cheia de projeto". Logo, a de terminação confiável das probabilidades de ocorrência de cheias na seção de projeto é uma das partes mais importantes no seu de senvolvimento.

Uma metodologia bastante utilizada é a denominada aná lise da frequência das cheias, que possui como principal desvan tagem o fato de um curto histórico de vazões limitar a precisão dos resultados.

Este trabalho tem por objetivo pesquisar a adequa ção do uso de modelos matemáticos determinísticos para a exten são de registros fluviométricos, com a finalidade de um cálculo mais confiável das magnitudes das vazões associadas a diversos períodos de retorno.

O método de análise da frequência das cheias foi apli cado a três diferentes tipos de conjuntos de dados: amostras pa ra períodos de 30 anos de registros observados; amostras forma das pelos 10 anos iniciais observados; e amostras estendidas de 30 anos, obtidas pela aplicação de um modelo determinístico nos conjuntos dos 10 anos iniciais de observação.

A comparação dos resultados obtidos para os diferentes conjuntos de amostras com os valores "verdadeiros" das cheias associadas a vários períodos de recorrência indicam a validade da metodologia proposta.

ABSTRACT

The costs, shapes and dimensions of the structures involved in any hydraulic project are strongly influenced by the selected "design flood" value. Thus, a reliable determination of the flood frequency at the project site is one of the most important requirements in its development.

The well-known methodology called flood frequency analysis has the inconvenient of limiting the results precision, when applied to a short period of historical data.

The main objective of this work is to analyze the use of deterministic mathematical models for the extension of the available observed values, in order to obtain a more precise evaluation of the magnitude of flows associated with several return periods.

The flood frequency analysis was applied to three different types of data sets: samples of 30 years of observed records; samples composed by the first 10 years of theses records; and extended 30 year samples, obtained by the application of a deterministic model to the sets of the first 10 years of observed records.

The comparison of the results obtained for the different types of data sets with the "real" flood values associated to several recurrence intervals indicates the validity of the proposed methodology.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	- <u>INTRODUÇÃO</u>	1
I.1	- APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	1
I.2	- OBJETIVOS E METODOLOGIA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO II	- <u>REVISÃO DA LITERATURA</u>	8
II.1	- CHUVA - UM PROCESSO HIDROLÓGICO INTERMITENTE	8
II.1.1	- Geração das Séries Sintéticas Diárias de Chuva	11
II.2	- MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA	13
II.2.1	- Dados de Entrada Imperfeitos	18
II.2.2	- Estrutura e Equações do Modelo Conceitual	19
II.2.3	- Métodos de Cálculo da Precipitação Média na Bacia	22
II.2.4	- Fase de Calibração do Modelo	25
II.2.4.1	- Função Objetivo Adotada na Otimização dos Parâmetros	34
II.2.4.2	- Comprimento do Registro de Dados Necessário para Calibração do Modelo	35
II.3	- ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DAS CHEIAS	36
CAPÍTULO III	- <u>MODELOS E PREMISSAS ADOTADAS NO TRABALHO</u>	42
III.1	- GERAÇÃO DA POPULAÇÃO DE DADOS NECESSÁRIOS	42
III.1.1	- Geração da Chuva	44
III.1.1.1	- Desenvolvimento Matemático do Modelo KELMAN	44
III.1.1.2	- Dados Utilizados na Geração das Chuvas	50

III.1.2 - Geração das Descargas Diárias	52
III.1.2.1 - Significado dos Parâmetros	55
III.2 - MODELO UTILIZADO NA EXTENSÃO DOS REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS	59
III.2.1 - Características do Modelo	59
III.2.1.1 - Significado dos Parâmetros	61
III.2.1.1 - Estrutura das Rotinas do Modelo	62
III.2.2 - Desenvolvimento Matemático do Método de Rosenbrock	67
III.2.3 - Função Objetivo e Tamanho do Registro Adotado nas Simulações	74
III.3 - METODOLOGIA DE PREVISÃO DA MAGNITUDE DAS CHEIAS	76
III.3.1 - Estudos Iniciais com a População de Dados	79
CAPÍTULO IV - <u>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS</u>	82
IV.1 - FASE DE GERAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NO TRABALHO	82
IV.1.1 - Resultados Obtidos na Geração dos Dados	83
IV.1.2 - Resultados da Fase de Calibração dos Dados	89
IV.2 - FASE DE PREVISÃO E ANÁLISE DOS VALORES DAS CHEIAS PARA OS CASOS ESTUDADOS	99
CAPÍTULO V - <u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	115
V.1 - CONCLUSÕES REFERENTES AO TRABALHO	115
V.2 - RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	118
<u>APÊNDICE</u>	122
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	127

INTRODUÇÃO

I.1- APRESENTAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Uma cheia pode ser classificada como um estado efêmero dos rios, caracterizado por grandes volumes e elevadas lâminas d'água, que ocasionam, na maioria dos casos, a transposição das margens e consequentes inundações nas áreas adjacentes.

A determinação confiável das probabilidades de ocorrência de vazões diárias, ou referentes a um outro período de tempo qualquer, com várias magnitudes num dado local é, certamente, uma das partes mais importantes dentro do desenvolvimento de um projeto hidráulico. O valor da descarga selecionada como a "cheia de projeto" irá determinar as formas, dimensões e os custos das estruturas a serem construídas.

Logo, o desenvolvimento de métodos mais convenientes e realistas para a predição da frequência de ocorrência das cheias, vem sendo um dos objetivos da pesquisa no campo hidrológico. Nesta linha, existem duas principais correntes reunindo os métodos usualmente adotados.

Os considerados pertencentes à primeira corrente utilizam os registros das cheias verificadas no passado, para prever a magnitude e frequência das que ocorrerão no futuro. Fazem, portanto, a suposição de que os eventos meteorológicos e as características da área de drenagem, que determinam o escoamento superficial, se manterão inalterados no futuro.

As metodologias agrupadas na segunda corrente procuram considerar, de alguma forma, as condições atuais e futuras da bacia contribuinte. Adotam modelos matemáticos para simular o comportamento da área de drenagem, e com as condições meteorológicas verificadas no passado, consideradas representativas das

que ocorrerão no futuro, determinam as magnitudes e frequências das cheias.

Existem, ainda, algumas fórmulas que relacionam diretamente os valores das vazões à área da bacia, através de relações empíricas. Estas, porém, podem ser consideradas pertencentes à primeira corrente de pesquisa.

De uma forma geral, todos os métodos utilizados na determinação da cheia de projeto possuem vantagens e desvantagens. O principal método da primeira corrente, denominado análise da frequência das cheias, é de grande simplicidade e aparente confiabilidade; características que o tornaram bastante conhecido e utilizado em projetos hidráulicos.

O fato de trabalhar com vazões reais observadas, caracteriza a confiança depositada por muitos engenheiros neste método, em detrimento dos procedimentos em que as descargas são geradas por modelos matemáticos, mesmo sendo estes previamente ajustados às características da bacia de projeto.

A principal desvantagem do método consiste no fato de um curto período de dados limitar a precisão das magnitudes das cheias estimadas. Além do mais, como as variações climáticas são, em geral, plurianuais, é difícil estabelecer se os curtos registros são de períodos secos ou chuvosos.

A predição com o método é, também, duvidosa, para as cheias de baixa probabilidade de ocorrência (de 5% a 1% de probabilidade), em função da falta de informação nos dados observados. Em outras palavras, para estimar a probabilidade de ocorrência de vazões com valores elevados, a curva das frequências a partir das observações deve ser extrapolada, em geral, de 5 a 50 vezes.

Diversos trabalhos, publicados na literatura, enumeram as vantagens e os problemas decorrentes do uso não criterioso do método. VICTOROV⁶², expressou:

"This method may not be appropriate for computing design floods for major projects. ... their values are greatly dependent on the period and length of record used".

BENSON⁵, realizou um trabalho significativo, cuja conclusão é expressa pelos valores do quadro (Q.I.1) a seguir. Tais resultados demonstram o grau de confiabilidade esperado na previsão de uma cheia, em função do tamanho da amostra disponível.

QUADRO Q.I.1 - RESUMO DOS RESULTADOS DO TRABALHO "CHARACTERISTICS OF FREQUENCY CURVES BASED ON A THEORETICAL 1000-YEAR RECORD" (BENSON⁵)

LENGTHS OF RECORD NECESSARY TO COME WITHIN 25% OF THE CORRECT VALUE 95 OR 80% OF THE TIME

MAGNITUDE OF FLOOD (T IN YEARS)	LENGTH OF RECORD (YEARS)	
	95% OF THE TIME	80% OF THE TIME
2,33	12	-
10	18	8
25	31	12
50	39	15
100	48	-

LENGTHS OF RECORD NECESSARY TO COME WITHIN 10% OF THE CORRECT VALUE 95 OR 80% OF THE TIME

MAGNITUDE OF FLOOD (T IN YEARS)	LENGTH OF RECORD (YEARS)	
	95% OF THE TIME	80% OF THE TIME
2,33	40	25
10	90	38
25	105	75
50	110	90
100	115	110

Os métodos da segunda corrente de pesquisa estão sendo cada vez mais difundidos, principalmente, em face do grande avanço tecnológico das últimas décadas, com o surgimento de computadores de maior capacidade de memória e rapidez no processamento. Desta forma, torna-se viável o desenvolvimento de modelos matemáticos mais completos, e portanto de maior complexidade, para representar uma bacia hidrográfica.

Os modelos utilizados, embora bastante divulgados na sua conceituação geral, ainda carecem de uma quantidade de aplicações práticas que propiciem uma melhor compreensão dos mesmos, além da escolha adequada daquele que melhor se ajuste a bacia em estudo e aos propósitos de um particular projeto.

A obtenção de um registro para uma seção de uma determinada área de drenagem, através do uso de um modelo matemático, em geral, a partir das características da bacia e dos registros de precipitação e evaporação é, sem dúvida, uma das grandes vantagens destas metodologias.

Deve ser ressaltado, entretanto, que o uso de tais modelos requer uma análise cuidadosa, principalmente, na fase de calibração dos seus parâmetros. CLARKE¹², mostra a importância da escolha criteriosa dos dados básicos para o ajuste do modelo, da seguinte forma:

" Mathematical models are no replacement for field observations; their value lies in their ability, when correctly chosen and adjusted, to extract the maximum amount of information from the available data."

Tendo em vista a necessidade de um maior volume de dados sempre que é necessário uma maior confiabilidade na previsão das cheias, como verifica-se nos trabalhos de BENSON⁵ e outros autores, e por outro lado, a consciência da possibilidade da extensão dos registros fluviométricos através do uso de modelos matemáticos, a motivação principal deste trabalho é pesquisar o índice de melhoria na obtenção das magnitudes das cheias, a partir de uma composição das metodologias das duas correntes de pesquisa.

I.2- OBJETIVOS E METODOLOGIA DO TRABALHO

O presente trabalho baseia-se na comparação e análise dos valores obtidos para as vazões de cheias referentes a uma bacia hidrográfica, com o método da análise da frequência das cheias, a partir de amostras de curtos registros de dados e de amostras cujos comprimentos foram estendidos com o uso de modelos matemáticos.

A metodologia proposta para o desenvolvimento desta pesquisa é composta por três principais etapas. A primeira refere-se a composição de uma população de registros diários de precipitações, dados de evapotranspiração e descargas, extensa o suficiente para servir de base às futuras análises das magnitudes das cheias geradas.

O comprimento desta população foi fixado em 900 anos, para possibilitar o conhecimento do valor "verdadeiro" da magnitude das cheias associadas a diversos períodos de retorno. Em função da inexistência de registros observados em alguma bacia hidrográfica com tal comprimento, foram selecionados modelos matemáticos para a geração de tais dados.

Na elaboração das séries sintéticas de precipitação adotou-se o modelo desenvolvido por KELMAN³², e posteriormente com estas precipitações, através de uma versão do modelo matemático de simulação determinística de bacias hidrográficas de CRAWFORD e LINSLEY¹⁴, foram geradas as vazões diárias requeridas para compor a população de dados.

Numa segunda etapa, admitindo a disponibilidade de poucos anos de dados observados na maioria das bacias hidrográficas brasileiras, não só em termos dos registros de chuvas, mas principalmente dos referentes às descargas, será subdividida a população gerada em 30 arquivos contendo, cada um, 30 anos dos registros de chuvas e respectivas descargas diárias.

Nesta etapa, ainda, adotando uma versão do modelo de IBBITT e O'DONNELL²⁷, desenvolvida por CANEDO¹⁰, que é um modelo

matemático para a simulação determinística de áreas de drenagem, com rotinas para a calibração automática de seus parâmetros, efetuar-se-ão os seguintes procedimentos:

- a) Para cada um dos 5 primeiros anos de dados dos 30 arquivos existentes, serão ajustados os parâmetros do modelo.
- b) Considerando os registros de precipitação compreendidos entre os anos 11 e 30 de cada arquivo, e os respectivos conjuntos "ótimos" de parâmetros, serão gerados 20 anos de vazões diárias, com este modelo.
- c) Serão compostos 30 novos arquivos contendo os 10 primeiros anos de vazões "observadas", isto é, os valores diários pertencentes a população gerada, e os 20 anos de vazões obtidas a partir da extensão dos registros através do modelo.

A terceira etapa do trabalho será a de previsão das magnitudes das cheias, tendo por base os períodos de retorno de 50, 100 e 1000 anos, com a utilização da distribuição de eventos extremos de GUMBEL²⁴. Serão determinadas as cheias para tais recorrências a partir dos arquivos com 30 anos de dados "observados"; para apenas os 10 primeiros anos desses arquivos; e finalmente, com os 30 novos arquivos compostos após a extensão dos registros.

Será efetuada uma análise comparativa dos valores das cheias resultantes para os três casos, em relação aos valores "verdadeiros" verificados para a população de 900 anos gerada para o estudo.

Os totais de 10 e 30 anos selecionados, procuram representar as reais disponibilidades de registros em grande número das bacias hidrográficas do Brasil, onde as suas seções principais possuem registros de chuvas e vazões cujos comprimentos estão em torno de 30 a 40 anos, enquanto as diversas seções secundárias, em geral, possuem registros de precipitações de igual comprimento, porém observações de descargas na faixa de 10 a 15 anos. Contudo, deve ser mencionado que as bacias hidrográficas das regiões Norte e Centro-Oeste do país não possuem tais disponibilidades de registros, sejam de chuvas ou de descargas.

Com a metodologia descrita, procurar-se-á determinar a adequação do uso de modelos matemáticos para a extensão de registros fluviométricos, tendo por finalidade um cálculo mais confiável das magnitudes das cheias de um projeto hidráulico, uma vez que os resultados obtidos por BENSON⁵, VICTOROV⁶² e outros, demonstram a necessidade dos registros serem tanto maiores quanto menor o for a probabilidade de ocorrência do evento desejado.

No capítulo II, é feita uma revisão da literatura existente, em consonância com os objetivos do trabalho, expressando o estado da arte atual. A descrição dos modelos matemáticos, funções e premissas adotadas na elaboração desta pesquisa, encontra-se no capítulo III, enquanto no capítulo IV, é apresentado um resumo de todos os resultados relevantes do estudo.

Finalmente, no capítulo V, serão analisados os resultados alcançados e apresentadas as conclusões e recomendações para futuros trabalhos julgados de interesse, em face da necessidade de maiores pesquisas neste campo.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma apresentação de alguns trabalhos existentes no meio técnico, de interesse ao desenvolvimento desta pesquisa. Uma tentativa de reconstituição, não exaustiva, do progresso realizado através dos anos, no desenvolvimento de modelos matemáticos conceituais para a simulação dos fenômenos físicos, é relevante não só para a realização deste trabalho como também para futuras pesquisas no campo.

Em consonância com os objetivos, foram relacionados trabalhos sobre a modelagem do fenômeno "chuva", alguns sobre modelos matemáticos para simulação determinística de bacias hidrográficas, e sobre as distribuições de probabilidades comumente utilizadas na análise da frequência das cheias. Para facilidade de exposição este capítulo foi dividido em três principais seções, a saber:

- II.1- Chuva-Um Processo Hidrológico Intermitente
- II.2- Modelos Matemáticos de Simulação Determinística
- II.3- Análise da Frequência das Cheias

II.1- CHUVA - UM PROCESSO HIDROLÓGICO INTERMITENTE

Os processos hidrológicos são classificados, para propósitos práticos, em contínuos e intermitentes. A maioria dos processos temporais climatológicos e hidrológicos são contínuos, ou seja, não possuem valores nulos ao longo do tempo. Por outro lado, fenômenos tais como a evaporação, a precipitação e o transporte de sedimentos na calha fluvial, representam processos intermitentes típicos.

Os recursos hídricos superficiais ou subterrâneos tem como origem a precipitação. Portanto, torna-se evidente a importância do conhecimento do fenômeno "chuva".

O conhecimento da precipitação é importante no caso da utilização de modelos para a simulação do comportamento de bacias hidrográficas. Isto porque, tais modelos permitem a geração de vazões a partir da precipitação, e da evapotranspiração potencial, através de um sistema considerado determinístico, ou seja, a bacia. Nestes casos, a natureza estocástica da vazão é considerada função da natureza estocástica dos insumos. Logo, sendo a variação anual da evapotranspiração potencial bastante pequena, atribui-se então a natureza estocástica das vazões, principalmente, ao caráter aleatório da precipitação.

Outra razão que justifica a investigação do fenômeno "chuva", deriva do fato de que os dados de precipitação são disponíveis, geralmente, para um período maior que os de vazão. Através do uso de modelos conceituais, pode-se estender o período dos dados de vazão para o disponível de chuvas.

O fator talvez mais importante que caracteriza a chuva, é que esta sofre menos influência das atividades antrópicas (atividades relativas ao homem) que a vazão. A construção de reservatórios, retificação de rios, urbanização de bacias, etc, alteram todo o regime das vazões naturais, ao passo que na fase atmosférica os processos são menos suscetíveis a modificações processadas na face terrestre, e entre eles destaca-se a chuva.

A origem do fenômeno chuva está nas moléculas de água existentes na superfície terrestre, que sob o efeito da energia térmica aumentam suas velocidades ao ponto de algumas conseguirem escapar através da interface líquido-gás, correspondendo ao processo denominado evaporação. Esse processo contínuo faz com que o ar vá se tornando cada vez mais carregado de umidade.

Este ar permanece com o vapor d'água absorvido até que se resfrie abaixo de uma determinada temperatura, denominada "ponto de orvalho", quando ocorre a condensação e começa o processo

de formulação de gotículas d'água. À medida que o número de gotículas aumenta passa a existir uma interação entre elas e as impurezas sólidas em dispersão no ar, dando origem a gotas maiores que se precipitam sob a forma conhecida por chuva, ou se a temperatura for suficientemente baixa, como granizo ou neve.

Em geral, são formuladas quatro relações, denominadas "LEIS DA CHUVA", que interrelacionam a intensidade com a duração, o período de retorno, a área e a distância ao centro da precipitação. RONDON⁵³, enunciou tais leis como a seguir:

- " 1.^a) A intensidade das precipitações com o mesmo tempo de recorrência é inversamente proporcional à sua duração."
- " 2.^a) A intensidade das precipitações com a mesma duração é diretamente proporcional ao seu tempo de recorrência."
- " 3.^a) A intensidade das precipitações é inversamente proporcional à sua área de precipitação."
- " 4.^a) Em um determinado período chuvoso as intensidades ou as alturas de precipitação decrescem do centro da área de precipitação para a sua periferia, segundo uma lei parabólica."

Um dos efeitos diretos da chuva numa bacia hidrográfica é o escoamento superficial. Quando a quantidade de água caída em curto espaço de tempo ultrapassa a capacidade de infiltração do solo, e outras deduções como a interceptação, evaporação, etc, a água vai escoar superficialmente alimentando os cursos d'água. Assim, esta parte da chuva terá um efeito tanto mais importante quanto maior for a sua intensidade e área ocupada na bacia.

A espessura da lâmina do escoamento superficial pode ser considerada como uma carga hidráulica reguladora da velocidade do escoamento. Desta forma, o tempo de concentração (definido como o tempo necessário para que a chuva que cai no ponto hidráulicamente mais distante de uma seção considerada alcance a mesma) diminui para um aumento daquela carga hidráulica. A combinação dos vários fenômenos, acima descritos, influencia o valor da cheia resultante.

Um dos efeitos indiretos da chuva na bacia é o escoamento básico, de base, ou subterrâneo. A chuva caída numa superfície permeável vai sendo parcialmente absorvida e percola-se no solo. A sequência dos mecanismos de infiltração, percolação e de recarga do lençol subterrâneo é complexa, lenta e cumulativa. Assim, a parcela de água filtrada sofre um retardamento e amortecimento em seu trajeto pelo solo até o aparecimento no rio. O que foi expresso por LOTUFO³⁸, como a seguir.

" Como o efeito direto da chuva é caracterizado por grandes oscilações da vazão em pequenos intervalos de tempo, a distribuição da chuva no espaço e no tempo é de vital importância. Tal fato é menos importante no caso das vazões básicas, quando a chuva sofre um processo de retardamento, no solo, sendo função principalmente da altura precipitada e praticamente independente da distribuição espacial e temporal da chuva."

II.1.1- Geração das Séries Sintéticas Diárias de Chuva

A escolha do fenômeno físico "chuva diária" para uma modelagem matemática, com a finalidade da geração de séries sintéticas, defronta-se com um problema bastante complexo. Ao se gerar a chuva, está-se, na realidade, gerando três variáveis aleatórias, a saber: a altura da chuva, a duração do período chuvoso e a duração do período seco. Estas três variáveis deverão, portanto, ser representadas no modelo matemático.

De uma forma geral, todos os modelos disponíveis na literatura são compostos de duas fases distintas:

- a) determinação, no intervalo unitário de tempo da geração, se chove ou não;
- b) se chove, qual a altura precipitada.

KELMAN³², define quais as características necessárias a um modelo gerador de chuvas, como a seguir:

"...a general model should have the capability to cope with these subjects: (i) the non-stationarity of the process, (ii) the time persistence of the process, (iii) the expansion from the univariate case to the multivariate (several rainfall stations), and (iv) the extreme events".

A consideração do fenômeno "chuva" ser um processo estocástico intermitente, não-negativo, derivou da constatação do fato de que os registros de precipitação diários possuem um grande número de zeros.

Algumas outras aproximações utilizadas para modelar tal processo estão, por exemplo, nos trabalhos de DAS¹⁵, VERSCHURENT¹⁶ e, TODOROVIC e YEVJEVICH⁵⁷, baseadas em distribuições de probabilidade e aproximações sazonais. O uso da aproximação sazonal nos modelos de geração de séries sintéticas de precipitação, baseou-se no fato de que uma transição brusca entre o último dia de um período e o primeiro dia do período seguinte não seria recomendável, tornando-se necessária uma representação "suave" para a variação dos parâmetros do modelo ao longo dos períodos do ano.

Em uma outra alternativa para a aproximação sazonal, passou-se a considerar a chuva como uma combinação de um processo determinístico e um estocástico estacionário. Uma vez identificada a componente determinística, representada nos parâmetros periódicos, pode-se isolar e modelar a parte estocástica, em geral através de um esquema linear autorregressivo.

Sabendo-se da existência de uma componente independente aleatória nos modelos autorregressivos, alguns trabalhos foram realizados para procurar determinar a distribuição de probabilidade de melhor aderência a este "ruído". Como exemplos podem ser citados os trabalhos de YEVJEVICH⁶⁷ e ADAMOWSKI e SMITH¹, sendo que este, embora sem uma maior justificativa, assumiu que a componente independente aleatória fosse normalmente distribuída.

Como a chuva exibe uma certa persistência, ou seja, a probabilidade de chover num dado instante é maior se no instante anterior ocorreu chuva, surgiram trabalhos na literatura com

a finalidade de quantificar este grau de dependência, tanto nos períodos reconhecidamente úmidos como nos secos. Situam-se nesta linha de pesquisa os modelos de GABRIEL e NEUMANN²²; GRACE e EAGLESON²³; NICKS⁴⁴ e PATTISON⁴⁷. Neste caso, os modelos existentes geralmente utilizam uma cadeia de MARKOV para representar a fase que determina se chove ou não. KELMAN³² observa que:

" Any MARKOV - chain approach suffers from the opposite effects between the need for a large number of states (for an increase of precision) and the explosion of the number of transition probabilities which must be estimated. Analytical distributions not, always can be fitted to alleviate the problem."

A maioria dos modelos existentes dizem respeito à geração de séries em um único posto. Quando é necessária a geração para uma rede de postos pluviométricos, a complexidade aumenta, tornando os modelos bastante sofisticados, embora sejam utilizadas várias hipóteses simplificadoras. Para o caso multivariado, podem ser citados os modelos de KELMAN³²; FRANZ²⁰; KRAEGER³⁴; SCHAAKE et al.⁵⁵; e LOTUFO³⁸.

Um aspecto na geração das séries sintéticas de precipitação, que não mereceu uma maior consideração nos modelos existentes, é a reprodução das sequências que causaram eventos extremos, tais como cheias e secas históricas verificadas. Neste caso, existe o trabalho pioneiro de TODOROVIC e WOOLHISER⁵⁸ e, posteriormente, o modelo formulado por KELMAN³².

Deve ser ainda mencionada a classe de modelos desenvolvidos a partir da hipótese de que a precipitação diária seja um processo aleatório independente. Tais modelos só tem a aplicação justificada nos casos em que a persistência não exerce grande influência no regime pluviométrico..Pertencente a tal classe é o modelo desenvolvido por MERO⁴¹ para a geração em um único posto.

de projeto e operação dos sistemas hidráulicos, implicou num grande desenvolvimento desta área de pesquisa. Os modelos conceituais para a simulação do comportamento das bacias hidrográficas são resultantes de tais estudos.

Tais modelos foram elaborados visando a obtenção de registros de vazões, através do uso de relações matemáticas, que representassem os processos suscetíveis de ocorrer numa bacia hidrográfica, tendo como dados de entrada, principalmente, os registros de precipitação e evaporação potencial inerentes à esta bacia.

Estes modelos são, inevitavelmente, tanto mais complexos quanto maior for o número de relações e aproximações matemáticas utilizadas, para especificar as propriedades e os processos que ocorrem em todos os componentes relevantes da bacia hidrográfica. Estando o desenvolvimento e as aplicações de tais modelos ligados, diretamente, à criação de computadores mais rápidos no processamento e com uma maior capacidade de memória. DAWDY e O'DONNELL¹⁶, afirmaram que:

"The ideal model would specify completely the properties of and the processes that occur in all the relevant components of a catchment. ...our knowledge and techniques do not permit more than a coarse approximation to this ideal."

Na literatura existente, "THE SYNTHESIS OF CONTINUOUS STREAMFLOW HYDROGRAPHS ON A DIGITAL COMPUTER", por CRAWFORD e LINSLEY¹³, deve ser considerado como um dos trabalhos fundamentais no desenvolvimento dos modelos conceituais de simulação dos eventos hidrológicos. Este modelo foi programado para produzir um registro de vazões horárias, a partir de dados de evapotranspiração diária e precipitações horárias.

Outros modelos foram então desenvolvidos, entre os quais podem ser citados o "DAWDY AND O'DONNELL MODEL", o "STREAMFLOW SIMULATION AND RESERVOIR REGULATION MODEL-SSARR" e o "STANFORD WATERSHED MODEL-SWM". Todos desenvolvidos através de relações matemáticas que buscavam simular o comportamento de uma bacia hidrográfica.

Diversas aplicações práticas foram realizadas com tais modelos, tanto em pequenas como em bacias de grande porte. Obtendo sempre resultados bastantes aceitáveis, sem a necessidade, na maioria dos casos, de quaisquer modificações de ordem estrutural nos modelos.

Embora o uso de tais modelos para a geração de um registro de vazões, tenha uma grande aceitação no meio técnico em face dos bons resultados já obtidos, frequentemente surgem críticas à metodologia. Devem-se, principalmente, à forma de calibração dos parâmetros ("tentativa e erro") empregada nos modelos, onde os valores dos diversos parâmetros são determinados pela experiência do engenheiro em relação ao modelo. e à bacia hidrográfica do projeto. PITMAN⁴⁸ e CANEDO¹⁰, respectivamente, expressam este sentimento por:

" It must be appreciated that calibration of deterministic models is subjective and consequently no two modellers would be likely to home in on an identical set of parameters for a given model."

" This makes a model calibration not only a difficult but also a subjective phase."

O'DONNELL, em 1960, iniciou pesquisas para o desenvolvimento de técnicas automáticas que permitissem a determinação do melhor conjunto de valores para os parâmetros, visando retirar grande parte da subjetividade inerente à calibração dos modelos hidrológicos. Os resultados de tal estudo foram publicados posteriormente, em 1965. (DAWDY e O'DONNELL¹⁶).

Em 1970, LIOU³⁷ desenvolveu uma versão auto-calibrável do STANFORD WATERSHED MODEL IV, denominada OPSET/SWM. Outros modelos foram elaborados ou adaptados com a utilização de rotinas automáticas para o ajuste dos seus parâmetros, com a finalidade de reduzir o inconveniente do método de "tentativa e erro", anteriormente adotado. Podem ser citados o "DAWDY AND O'DONNELL MODEL", o "INSTITUTE OF HYDROLOGY MODEL" e o "LICHTY, DAWDY AND BERGMANN MODEL", entre vários.

Os modelos que utilizam rotinas automáticas para cali
bração dos seus parâmetros conseguem eliminar a sub
jetividade inerente a estimação dos valores dos parâmetros, entretanto, é
incorporado um novo fator subjetivo ao processo, qual seja, a
escolha da função objetivo. Este aspecto foi um dos objetos de
análise do trabalho desenvolvido por CANEDO¹⁰ e, posteriormente,
será novamente abordado nesta pesquisa.

Os modelos conceituais determinísticos possuem várias
aplicações no campo hidrológico, tais como o preenchimento de
falhas ou a extensão dos registros de vazão para um seção de me
dição, nos projetos de irrigação, nos estudos sobre os efeitos
da urbanização dentro de uma bacia hidrográfica, na previsão de
vazões, tendo como entradas séries sintéticas de precipitações,
etc.

No caso específico dos efeitos da urbanização em ba
cias, por exemplo, existe a necessidade de parâmetros com uma
alta significação física, devendo os mesmos ser aferidos perio
dicamente na bacia. Contudo, na impossibilidade de serem efetua
das tais medições, ou em função dos custos ou por resultar em
procedimentos complexos e demorados, a adoção de modelos matemá
ticos que admitam a validade de faixas de variação para os valo
res dos parâmetros, representaria a única forma capaz de prever
a urbanização e outras modificações na bacia com confiança.

Contudo, tais modelos não são amplamente utilizados nos
projetos de sistemas hídricos, pela necessidade do grande uso
de computadores, e ensaios de laboratório com um alto custo as
sociado, e em parte, dada a existência de diversos fatores que
causam incertezas nos resultados obtidos.

Estas incertezas decorrem de vários fatores, tais co
mo: a qualidade dos dados observados, a estrutura do modelo de
simulação e o processo de calibração dos parâmetros adotado. A
qualidade dos dados engloba, entre outras coisas, os problemas
de erros na coleta e transcrição dos registros; a transforma
ção de registros pontuais, como os de precipitação, em médias
espaciais; a discretização, por médias, de variações temporais

contínuas; e a estimação de variáveis que não são observadas diretamente, como os dados de evapotranspiração.

As incertezas decorrentes da estrutura do modelo relacionam-se com a falta de conhecimento de alguns dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia; as aproximações necessárias para representar tais processos matematicamente; a variação espacial das características da bacia; a priorização da sequência de execução de processos que são simultâneos na natureza; e a omissão de alguns processos quando da elaboração do modelo, por serem considerados sem importância para os propósitos de sua aplicação.

Em relação as incertezas do processo de calibração dos parâmetros, exercem influência mais acentuada a escolha da função objetivo; o comprimento e o período do registro de dados a ser utilizado; o critério para definir os limites de variação dos parâmetros; e a dificuldade para estabelecer se um ponto ótimo atingido durante o desenvolvimento da calibração, é apenas um ótimo local ou é o ótimo global da função, como será mostrado posteriormente neste trabalho.

Algumas dessas incertezas merecem uma descrição mais detalhada para propiciar uma melhor compreensão e quantificação dos seus efeitos nos resultados dos modelos. Estas podem ser descritas como a seguir:

- a) Dados de entrada imperfeitos.
- b) Estrutura e equações do modelo conceitual.
- c) Métodos de cálculo da precipitação média na bacia.
- d) Fase de calibração do modelo.
 - d.1- Função objetivo adotada na otimização automática dos parâmetros.
 - d.2- Comprimento do registro de dados necessário para a calibração do modelo.

II.2.1- Dados de Entrada Imperfeitos

O desempenho de um modelo para a simulação de bacias hidrográficas está diretamente associado a qualidade dos dados utilizados, os quais em geral são os registros de precipitação, evaporação potencial e vazão referentes à bacia, e os relacionados com as características da mesma.

Como características da bacia são englobadas a área de drenagem, sua parte impermeável, a declividade e o comprimento do escoamento superficial, o tipo e a densidade de vegetação existente, os diversos tipos de solo componentes, e a geologia da bacia.

Em vários casos, embora haja a disponibilidade de um modelo apropriado para o estudo, as limitações existentes nos dados acarretam resultados pouco satisfatórios. Nesses casos é aconselhável a escolha de um modelo em função dos dados disponíveis, ou a coleta dos dados necessários para o uso do melhor modelo, tendo em vista as finalidades do projeto.

Para a primeira classe dos dados de entrada utilizados nos modelos, tem-se como limitações principais o número insuficiente de estações de medições, e registros referentes a curtos períodos de observação. Os problemas inerentes às características da bacia, em geral, são mais facilmente resolvidos, pois existe a possibilidade da coleta de tais dados durante o desenvolvimento do projeto.

Segundo CRAWFORD e LINSLEY¹⁴, e outros pesquisadores, os parâmetros de um modelo cujos valores podem ser avaliados através de medições na bacia hidrográfica estudada, não devem ser otimizados. Sendo utilizado tal processo para os parâmetros cujos valores só podem ser estimados. Contudo, os parâmetros obtidos através de medições sempre possuem um certo grau de incerteza, a qual será uma parte da incerteza nas simulações efetuadas com o modelo.

Os registros de chuvas e vazões selecionados como da

dos de entrada ao modelo. para a simulação da bacia, devem ser analisados visando a eliminação dos erros grosseiros de amostragem, dos erros sistemáticos em função da troca de observador ou equipamentos do posto, e da falta de homogeneidade, decorrente da mudança de localização da seção de medição.

Os erros existentes nos dados, sendo aleatórios e não tendenciosos, ocasionarão incertezas tanto menores quanto maiores forem os comprimentos dos registros utilizados. Tal fato é comprovado pela Lei dos Grandes Números.

A carência de dados é um problema antigo, e embora atualmente exista uma preocupação dos órgãos responsáveis, para um país com imensas bacias hidrográficas como o Brasil, as soluções não poderão ser obtidas em um curto prazo.

As incertezas devidas aos dados imperfeitos, foram bem caracterizadas por AITKEN².

" The existence of data errors must be recognised. Included in this category are the errors in the input data to the model including rainfall, evapotranspiration and various parameters used in equations describing the physical catchment processes. The gauged streamflow which is used for comparison with the estimated flows may also contain errors. Random errors in the data will undoubtedly produce Random errors in the output. Systematic errors in the data on the other hand, will probably not be apparent as errors in the output, but will be reflected as incorrect values in the parameters of the model".

II.2.2- Estrutura e Equações do Modelo Conceitual

Um modelo conceitual é um conjunto de equações e aproximações matemáticas, elaboradas com a finalidade de descrever os conceitos físicos do ciclo hidrológico.

A associação dos diversos processos hidrológicos dentro de uma sequência lógica, e a escolha da formulação matemática

ca apropriada para cada fenômeno, são os principais problemas inerentes a elaboração do modelo.

Ainda podem ser apontadas como limitações para a modelagem hidrológica conceitual, as dificuldades computacionais que surgem em função da complexidade matemática da própria estrutura do modelo. Tais dificuldades podem vir a exigir grandes simplificações na representação dos fenômenos físicos, o que invariavelmente diminui a potencialidade dos modelos elaborados.

Como expresso por VIESSMAN et al.⁶³, podemos considerar duas categorias de modelos conceituais, os de solução analítica ou, também denominados, de abordagem direta, e os de soluções não analíticas. Embora, os modelos pertencentes a primeira categoria sejam mais desejáveis, em face da obtenção precisa dos resultados, a maioria das equações matemáticas elaboradas para descrever os processos hidrológicos são de tal forma complexas, que soluções analíticas são impossíveis de serem obtidas.

Nesses casos, geralmente, são empregadas as aproximações por diferenças finitas, como soluções não analíticas para os problemas.

Independentemente da forma de resolução aproximada empregada, outras premissas são efetuadas na estruturação de um modelo, com a finalidade de representar os fenômenos físicos envolvidos no comportamento de uma bacia hidrográfica. Uma das principais premissas da modelagem é a representação dos fenômenos que ocorrem simultaneamente na natureza de forma discretizada, isto é, numa sequência pré-determinada. Nas simulações, um fenômeno físico só é executado após o término de outro, dentro da composição das expressões matemáticas de cada particular modelo. Um outro ponto, é a elaboração de um modelo com o objetivo voltado para um determinado estudo, suprimindo alguns processos inerentes ao ciclo hidrológico.

Contudo, não só o número de fenômenos físicos representados pelo modelo, mas também a sua ordem sequencial de resolu

ção, podem afetar os resultados decorrentes das simulações realizadas.

No que diz respeito ao objetivo da estruturação do modelo, podemos identificar dois grupos de modelos conceituais (DAWDY e O'DONNELL¹⁶):

1. Os modelos de múltiplos propósitos, cuja estrutura procura representar a maior parte dos fenômenos que ocorrem no ciclo hidrológico.
2. Os modelos específicos, os quais são desenvolvidos para o estudo de um caso particular.

As duas escolas estão profundamente interligadas, e o progresso no desenvolvimento de novos modelos, mais poderosos e que melhor representem o comportamento das bacias hidrográficas, só pode ser obtido tomando como base uma composição das relações adotadas por ambos os grupos.

Os modelos de propósitos específicos são, em geral, mais complexos, pois procuram reproduzir, o mais aproximadamente possível, um fenômeno em particular. Já os modelos que englobam as características gerais de uma bacia hidrográfica demandam um maior gasto computacional e tempo de elaboração dos respectivos algoritmos matemáticos.

Os modelos de múltiplos propósitos já tem testada a sua capacidade através de diversas aplicações práticas, nas quais verificaram-se bons ajustes entre as vazões simuladas e as observadas, como atestam CANEDO¹⁰, CRAWFORD e LINSLEY¹⁴, RICCA⁵² e outros, para bacias hidrográficas de diferentes formas e dimensões. Outrossim, quando tais modelos foram aplicados para a simulação de descargas referentes a períodos secos, os resultados obtidos só se mostraram aceitáveis nos casos das bacias cujas camadas do solo fossem de textura homogênea.

Tal fato foi analisado por HOLTAN²⁵, que concluiu ser a modelagem dos fenômenos inerentes às zonas componentes do solo, principalmente a infiltração e a percolação profunda, uma

grande fonte de incertezas em um modelo conceitual. Sendo, por tanto, um campo ainda não desenvolvido satisfatoriamente.

Para representar o fenômeno da infiltração foram elaborados alguns modelos conceituais (SINGH⁵⁶). Estes simularam, satisfatoriamente, os movimentos verticais e horizontais da água através das zonas saturadas e insaturadas do solo. Baseados em sistemas de equações diferenciais parciais, resolvidos por diferenças finitas, tais modelos sofrem as limitações decorrentes da grande quantidade de dados referentes ao solo, necessários e, geralmente, não disponíveis. Além disso, em face do excessivo gasto de tempo no processo de resolução do método empregado, tornam-se inviáveis de serem incorporados aos modelos que tem estrutura representando grande parte dos processos do ciclo hidrológico.

Tendo em vista as conclusões errôneas que podem ser obtidas na geração de vazões, principalmente, quando referentes a períodos secos, WHIPPLE⁶⁶, alertou para a necessidade de maiores pesquisas e contribuições neste campo.

II.2.3- Métodos de Cálculo da Precipitação Média na Bacia

Para definir a precipitação média a ser considerada como entrada nos modelos conceituais de simulação do comportamento das bacias hidrográficas, são utilizados os valores pontuais de precipitação medidos em uma única estação, ou em uma rede de estações pluviométricas existentes na área do projeto. RONDON⁵³ define "precipitação média" ou "altura de chuva equivalente" em uma área, como a altura de chuva fictícia, constante em toda a área considerada, que geraria o mesmo deflúvio pluvial da chuva real ocorrida, natural e irregular.

Tal procedimento introduz um erro na estimação dos dados de entrada ao modelo, uma vez que a precisão das respostas obtidas através do modelo dependem tanto da densidade e localização dos postos existentes na área em estudo, como dos métodos utilizados para o cálculo da precipitação média. Estes méto

dos nem sempre atentam para dois fatores, quais sejam, a variabilidade espacial da precipitação e a sua movimentação sobre a bacia.

Deve ser observado que as causas de incertezas que se rão abordadas nesta seção diferem daquelas devidas a adoção de dados imperfeitos como entradas ao modelo, sendo função não dos dados, mas sim da metodologia empregada.

Em razão da variabilidade espacial da precipitação existe a necessidade de ser estimada uma precipitação média sobre a área, geralmente utilizando os registros pontuais de várias estações pluviométricas e um dos métodos de cálculo existentes na literatura. Os três métodos mais comumente adotados são o da Média Aritmética, o de THIESSEN e o das Isoietas.

O método da Média Aritmética sofre muitas restrições, pois atribui o mesmo peso a todas as estações independentemente da sua localização. Consiste simplesmente em se calcular a média aritmética das alturas de chuva lidas nos diversos postos. O erro resultante é função da distribuição não uniforme desses postos sobre a área. O método de THIESSEN estabelece uma área de influência para cada posto, na qual se considera válida a mesma altura de chuva lida no posto, atribuindo portanto pesos diferentes às várias estações, mas ignorando completamente a topografia da bacia hidrográfica. Finalmente, o Método das Isoietas é o mais preciso de todos e aquele que apresenta conceituação mais racional, já que se baseia na distribuição da chuva sobre a área de interesse. Entretanto, o Método das Isoietas é muito trabalhoso, razão pela qual é preterido em favor do de THIESSEN, na maioria dos casos.

Uma outra metodologia, por processo de cálculo gráfico fundamentado na análise da rede de isoietas, determinando a lei de variação das alturas equivalentes em função das áreas de precipitação para períodos chuvosos individualizados, foi estabelecida por HORTON²⁶ através da equação de distribuição espacial das chuvas, a qual possui a seguinte forma:

$$h_{med} = h_o e^{-mA^n} \quad (II.1)$$

onde:

h_{med} - a altura equivalente da chuva com dada duração na área A

h_o - altura máxima da chuva na região que contém a área A

A - área de precipitação

m,n - parâmetros relativos às unidades adotadas e próprios de cada região estudada.

Antes da implementação de um modelo conceitual deve-se dar atenção a rede de estações pluviométricas disponível, e selecionar o método de cálculo da precipitação média que melhor se adapte as condições de projeto. O grau de incerteza associado a altura equivalente da chuva, mesmo no caso de precipitações estacionárias, é transferido tanto para os resultados como, em parte, para os valores dos parâmetros do modelo.

Uma vez que, na maioria dos casos, não temos precipitações estacionárias, e todos os métodos de cálculo não consideram o movimento das mesmas sobre a bacia, as respostas do modelo não conseguirão reproduzir as vazões observadas. Na prática, em função dos erros nos dados de entrada na fase de calibração do modelo, é produzido um conjunto de parâmetros distorcidos, cujos valores tendem a reduzir os efeitos dos erros nos dados, mas que limitam as futuras simulações com o modelo. Deve ser ressaltado que uma maior segmentação da bacia hidrográfica em estudo, poderia reduzir este problema.

DAWDY e BERGMAN¹⁷ realizaram pesquisas com o objetivo de determinar a influência da variabilidade espacial da precipitação nas simulações com os modelos determinísticos "chuva-vazão". Concluíram que a utilização dos registros pontuais de uma única estação pluviométrica acarreta erros da ordem de 20% nos valores altos das descargas simuladas, quando comparados com os observados.

As incertezas produzidas nas respostas dos modelos con

ceituais, em função da metodologia empregada para o cálculo da precipitação média sobre as bacias hidrográficas, devem ser melhor pesquisadas e quantificadas, com a finalidade de garantir uma maior precisão nas simulações. FLEMING¹⁸ expressou este fato por:

" Considerable work has already been undertaken to estimate average error involved in estimating areal mean rainfall using one or more gauges compared to the "true" areal mean rainfall estimated from all gauges".

II.2.4- Fase de Calibração do Modelo

A fase de calibração de um modelo conceitual a uma bacia hidrográfica, tem por objetivo a seleção do conjunto de parâmetros que torne o modelo representativo da bacia em estudo. Em outras palavras, na fase de calibração deve ser obtido um conjunto de parâmetros que reproduza, quando utilizado no modelo, valores simulados das respostas da bacia tão próximos dos observados, quanto o for a precisão requerida. Isto é, sem dúvida, bastante trabalhoso, sendo que IBBITT e O'DONNELL²⁸ afirmaram que:

" The major problem associated with the use of conceptual models of hydrological behaviour is their fitting to a given watershed".

A qualidade do ajuste, seja através do método de "tentativa e erro" ou por calibração automática dos parâmetros, quando considerada satisfatória, resulta no denominado conjunto "ótimo" de parâmetros. Isto é, os valores dos parâmetros do modelo foram otimizados. Quando são utilizadas rotinas automáticas para a calibragem, a precisão desejada é medida através do comportamento de uma função $F = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, denominada "função objetivo", a qual através de sua formulação matemática compara as respostas simuladas pelo modelo com os valores reais observados. As variáveis X_i , $i=1, 2, \dots, n$, são os parâmetros do modelo.

O método de "tentativa e erro" para o ajuste de um modelo a uma área específica, não é o mais indicado em função da sua grande subjetividade, como foi expresso por DAWDY e O'DONNELL¹⁶ :

" Without denying the power and advantages of using engineering judgment and acquired skills, it is likely that adjustment of the large number of parameters of more complex models by subjective trial and error procedures will become impracticable".

Portanto, serão analisadas apenas as incertezas resultantes do emprego de rotinas automáticas para a calibração dos parâmetros de um modelo nas respostas produzidas pelo mesmo.

Antes de serem abordados os problemas que surgem quando da utilização de rotinas automáticas de calibração, convém que algumas considerações sobre os métodos de otimização mais comumente adotados sejam enunciadas. O quadro (Q.II.1) a seguir, apresenta um resumo dos principais métodos de otimização. De uma forma geral, os métodos de otimização buscam minimizar ou maximizar uma função objetivo F definida por:

$$F = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

sendo:

X_i $i=1, 2, \dots, n$ - os " n " parâmetros a serem otimizados

Por outro lado, algumas das funções objetivo a serem otimizadas podem estar descritas numa forma quadrática como:

$$F = X^T A X + B X + C \quad (II.2)$$

onde:

- X - vetor coluna dos " n " parâmetros
- X^T - vetor transposto de X
- A - matriz positiva $n \times n$ arbitrária
- B - vetor linha arbitrário
- C - constante arbitrária

Em seguida, serão descritas resumidamente as principais etapas dos processos de busca do "ótimo" dos métodos constantes no quadro (Q.II.1), indicando se utilizam ou não a função objetivo na sua forma quadrática.

QUADRO Q.II.1 - MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Nº	DESCRIÇÃO DO MÉTODO	CLASSIFICAÇÃO	REFERÊNCIA
1	BUSCA UNIVARIADA	DETERMINÍSTICO	BEARD ⁴
2	BUSCA P/COORDENADAS CIRCULANTES	DETERMINÍSTICO	ROSENBROCK ⁵⁴ IBBITT ²⁷
3	BUSCA P/COORDENADAS CIRCULANTES COM INTERPOLAÇÃO QUADRÁTICA	DETERMINÍSTICO	McCONALOGUE ⁴⁰
4	BUSCA POR DIREÇÕES MUTUAMENTE CONJUGADAS	DETERMINÍSTICO	POWELL ⁴⁹ ZANGWILL ⁶⁸
5	BUSCA POR GRADIENTE	DETERMINÍSTICO	FLETCHER e POWELL ¹⁹
6	MÍNIMOS QUADRADOS C/ INVERSÃO IMPLÍCITA DA MATRIZ	DETERMINÍSTICO	POWELL ⁵⁰
7	MÍNIMOS QUADRADOS C/ INVERSÃO EXPLÍCITA DA MATRIZ	DETERMINÍSTICO	WALES ⁶⁴
8	MÍNIMOS QUADRADOS C/ PARÂMETROS DE LEVENBERG	DETERMINÍSTICO	MARQUARDT ³⁹ LEVENBERG ³⁵
9	MÉTODO ESTOCÁSTICO DA BUSCA	ESTOCÁSTICO	KARNOPP ^{30;31}

BUSCA UNIVARIADA - Este método de busca, intuitivamente o mais simples, procura o valor ótimo de F trocando só o valor de um parâmetro do conjunto por vez, até que o ótimo global para o conjunto de parâmetros seja encontrado. Quando todas as " n " direções (cada direção representa um parâmetro) já tiverem sido sucessivamente pesquisadas, um ciclo ou iteração é completado. A metodologia é repetida a partir do conjunto dos valores ótimos dos X_i , $i=1, \dots, n$ parâmetros já encontrados. Tal método resulta em direções de busca que são sempre paralelas aos eixos coordenados ortogonais (por definição um conjunto de eixos é ortogonal se e só se cada membro do conjunto é perpendicular a todos os outros).

A principal crítica ao método baseia-se no fato de não otimizar, satisfatoriamente, em problemas nos quais a superfície resposta da função objetivo F , quando aplicada aos parâmetros, for inclinada em relação às direções dos eixos. Tais formações são comuns sempre que existe algum grau de dependência entre os parâmetros. A busca do ótimo pelo método, nestes casos, progride muito lentamente ao longo da superfície.

BUSCA POR COORDENADAS CIRCULANTES - O primeiro ciclo deste método (ROSENBROCK⁵⁴) é idêntico ao do método da Busca Univariada. Após tal ciclo, contudo, as trocas não são realizadas separadamente em cada uma das direções, mas sim depois de uma rotação nas direções de busca. Tal rotação é determinada pelo progresso obtido no ciclo anterior.

Este método rapidamente ascende uma superfície inclinada em relação aos eixos iniciais, suprimindo a deficiência da Busca Univariada.

BUSCA POR COORDENADAS CIRCULANTES COM INTERPOLAÇÃO QUADRÁTICA - Este método (McCONALOGUE⁴⁰) é basicamente idêntico ao anterior, exceto que quando as trocas são efetuadas nos parâmetros, o método estima a melhor modificação através de interpolação quadrática ao longo da linha de busca.

A metodologia é muito eficiente quando a função objetivo utilizada for da forma apresentada na expressão (II.2).

BUSCA POR DIREÇÕES MUTUAMENTE CONJUGADAS - Esta técnica (POWELL⁴⁹; ZANGWILL⁶⁸), embora aplicável a funções objetivo não quadráticas, foi desenvolvida para encontrar o ótimo de funções quadráticas num número finito de ciclos. Para exemplificar, se F for definida por (II.2), para um modelo de dois parâmetros, os contornos de F formam um conjunto de elipses concêntricas. Após analisar a função objetivo F em vários pontos de uma direção arbitrária inicial qualquer, o ponto ótimo desta direção será obtido. Este ponto, obrigatoriamente, será o ponto de tangência da direção inicial selecionada, a uma das elipses da superfície resposta.

Tomando então uma direção paralela a inicial arbitrada, o ótimo desta nova direção também tangência uma outra elipse do conjunto. Logo, pela propriedade das elipses concêntricas, uma reta passando pelos pontos das direções paralelas, tangentes às duas elipses do conjunto, passará através do centro de todo o conjunto, isto é, o ótimo global. Esta propriedade das elipses pode ser generalizada para qualquer forma quadrática da função objetivo.

BUSCA POR GRADIENTE - Se as derivadas parciais da função objetivo F , com respeito aos N parâmetros, são disponíveis analítica ou numericamente, é possível estimar a direção na qual F muda seu valor mais rapidamente. Se forem alterados os valores dos parâmetros de tal forma que as elipses componentes da superfície resposta da função objetivo, sejam transformadas em círculos, a direção de máxima mudança na função F será perpendicular a tal contorno, e portanto radial aos círculos. O ótimo será encontrado, rapidamente, pela procura dentre as direções perpendiculares nos pontos de tangência das retas iniciais arbitradas em relação aos círculos, àquela de máxima declividade.

FLETCHER E POWELL¹⁹ apontaram as deficiências do método e elaboraram um processo alternativo, denominado Método dos Gradientes Desviados, no qual o ótimo de uma função em forma quadrática, é encontrado num número finito de ciclos.

MÉTODOS DOS MÍNIMOS QUADRADOS - Dada uma função F , como na expressão (II.2), é possível, teoricamente, resolver de forma analítica para os valores dos parâmetros, com os quais temos um ótimo para F . Os métodos dos mínimos quadrados assumem a função objetivo sempre na forma quadrática, sendo que para superfícies não-quadráticas, embora as hipóteses básicas sejam violadas, o método ainda pode ser utilizado desde que sejam feitas algumas aproximações.

Após os cálculos analíticos, a direção através do ótimo pode ser encontrada. Procurando ao longo desta direção, o melhor valor de F será obtido.

Os três métodos mais comumente adotados (POWELL⁵⁰; WALES⁶⁴; MARQUARDT³⁹), utilizam a técnica básica, diferenciando-se no desenvolvimento dos seus algoritmos.

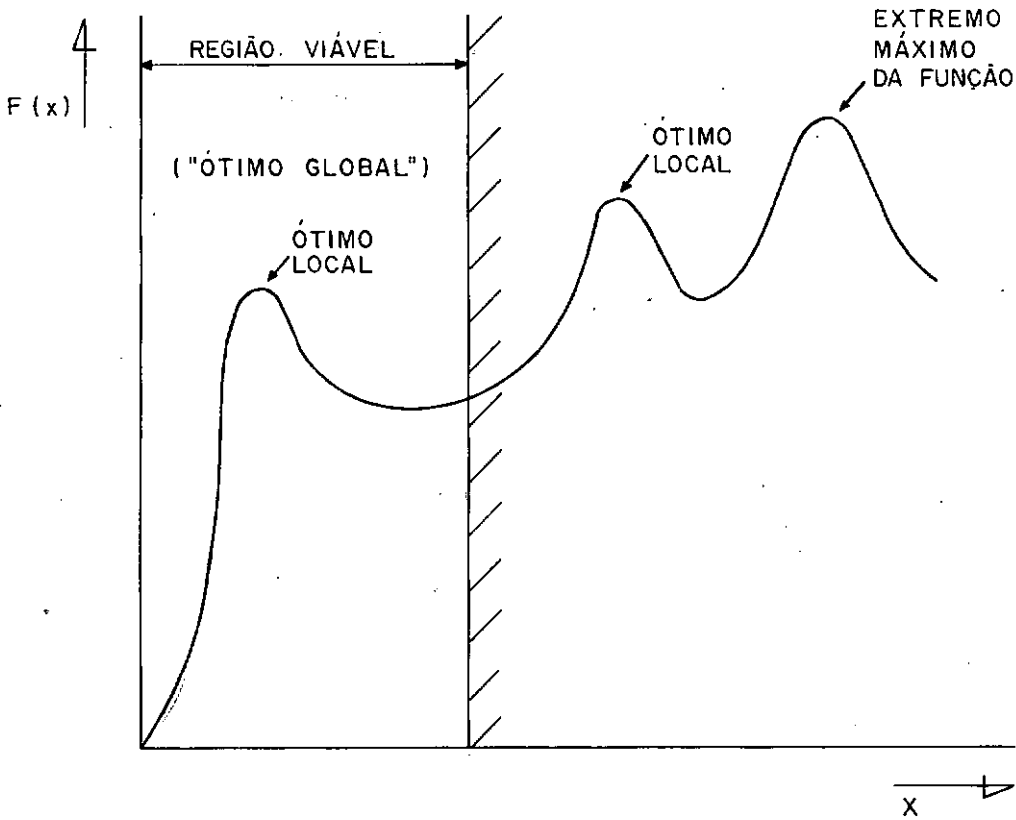
MÉTODO ESTOCÁSTICO DE BUSCA - Este método (KARNOPP^{30,31}) aleatoriamente seleciona conjuntos de parâmetros e determina o valor da função objetivo F , correspondente a cada um dos conjuntos selecionados. Dado que os valores selecionados foram retirados de distribuições cujas modas (por definição, a moda de uma distribuição é o valor de maior frequência da mesma) estão centradas nos melhores X_i , $i=1, \dots, n$, já obtidos, é possível progredir em direção ao ótimo da função.

Se as trocas aleatórias nos parâmetros causarem uma melhora no valor de F , os novos valores dos X_i , $i=1, \dots, n$, passam a ser considerados os melhores já obtidos, originando novas distribuições de números aleatórios, novamente com suas modas centradas nestes parâmetros. A metodologia é repetida, até que não sejam obtidos melhores valores para a função objetivo F .

Na descrição dos métodos de busca do valor ótimo de uma função objetivo F , foram sucintamente explicados os algoritmos para a obtenção do denominado "ótimo global" da função F . Neste aspecto, é importante ser ressaltado o significado do termo "ótimo global", quando utilizado em rotinas automáticas para a calibração dos parâmetros de um modelo.

Existe uma diferença entre os problemas de otimização e a teoria do Valor Extremo dos problemas de Cálculo. Tal fato está associado às restrições impostas aos X_i , $i=1, \dots, n$ parâmetros, uma vez que a região viável para a otimização, formada pelos limites permitidos para a variação de cada um dos parâmetros, pode englobar ou não o valor extremo da função F , quando aplicada aos parâmetros. A figura (F.II.1) exemplifica a diferença existente, para o caso de função com uma única variável.

FIGURA F. II.1 - OTIMIZAÇÃO COM RESTRIÇÕES - CASO DE FUNÇÃO COM UMA VARIÁVEL



Os principais problemas na otimização automática dos parâmetros, fontes de incertezas nas respostas dos modelos de simulação das bacias hidrográficas, são os ótimos locais, os de nominados "pontos de sela", os vales e os platôs.

ÓTIMOS LOCAIS - Os pontos de ótimo local possuem todas as propriedades do ótimo global, exceto o valor da função objetivo F . Logo, uma vez em um ponto de ótimo local todos os testes de convergência do modelo são satisfeitos, por exemplo, pequenas perturbações em torno deste ponto só conduzem a pontos cujos valores da função objetivo são inferiores (no caso da maximização da função) ou superiores (no caso de minimização). Além disso, os métodos de otimização não buscam outro ponto de ótimo local após terem encontrado um, pois por definição assumem a existência de um único ótimo. Este fato também os diferencia dos métodos de cálculo que, primeiramente, selecionam todos os extremos da função, para só então determinarem o máximo ou mínimo, em função do objetivo a ser atingido.

Dado que, em geral, o ótimo global não é conhecido a priori, a única coisa a ser feita é recomençar a otimização, a partir de valores iniciais diferentes, e esperar que o ótimo global seja encontrado após um número finito de tentativas.

PONTOS DE SELA - Os denominados pontos de sela são caracterizados por possuir um máximo numa direção e um mínimo ao longo de outra. Portanto, é causa de problemas nos métodos de otimização, pois estes seguem processos de troca da direção de busca bastante rígidos e lentos, o que leva a possibilidade de serem selecionadas direções de busca que possuam pontos "ótimos" nas mesmas, conduzindo a resultados finais errôneos.

VALES - Um outro problema que surge na superfície resposta da função objetivo F quando aplicada aos parâmetros do modelo, no caso dos mesmos serem correlacionados, são as formações de vales. Tais vales podem ser retilíneos ou curvos, sendo inclinados em relação aos eixos coordenados. Os métodos cuja otimização é feita para cada um dos parâmetros por vez (por exemplo, BUSCA UNIVARIADA) tendem, com a existência de vales, a ter uma convergência prematura.

Em contraste aos ótimos locais e aos pontos de sela, uma das causas de ocorrência dos vales é bem conhecida. Os parâmetros adotados podem estar relacionados entre si, isto é, podem existir correlações entre alguns parâmetros. Por exemplo, se dois parâmetros são relacionados linearmente, então um vale retilíneo, inclinado em relação as duas direções, surgirá na superfície resposta.

PLATÔS - É um problema característico da aplicação dos métodos de otimização aos modelos conceituais para a simulação de bacias hidrográficas. Surgem quando mudanças nos valores de determinados parâmetros não causam modificações no valor da função objetivo. Tais parâmetros passam a ser denominados "sem-sentido".

As causas de ocorrência desses parâmetros são, principalmente, as "lâminas" de armazenagem dos reservatórios e os parâmetros relacionados às quantidades potenciais. Em ambos os casos, pela imposição de valores não correspondentes a realidade é possível que outros parâmetros do modelo passem a não ter sentido, isto é, se tornem inativos. Isto significa que para tais parâmetros "sem-sentido", seu efeito na função objetivo é nulo, quaisquer que sejam os valores dos mesmos. Contudo, deve ser ressaltado que uma modificação nas causas desses platôs, pode tornar os parâmetros ativos novamente.

O maior perigo com os platôs ocorre quando os parâmetros "sem-sentido" durante a fase de calibração do modelo, principalmente em função dos dados utilizados na mesma, tornarem-se ativos durante as subseqüentes previsões com o modelo.

A utilização de rotinas automáticas para a calibração dos parâmetros de um modelo, embora muito menos subjetivas que o procedimento de "tentativa e erro", também geram fatores de incertezas nas respostas fornecidas pelo mesmo.

O conjunto inicial de parâmetros fornecidos ao modelo não é um problema crítico. As rotinas de otimização produzem uma convergência muito rápida durante as primeiras iterações. Porém, na maioria dos casos, o ótimo global da função objetivo nunca é alcançado, sendo satisfatório o "ótimo" obtido após um préfixado total de cálculos da função objetivo, como expresso por CANEDO¹⁰.

" While an optimization routine may potentially be able to reach the "GLOBAL OPTIMUM POINT", usually the calibration is stopped when a given number of search cycles is reached, or when the rate of improvement in the objective function becomes negligible."

Como exposto, a metodologia de otimização, o número de iterações na busca do ótimo global, os parâmetros fornecidos longe da realidade, e as restrições impostas aos mesmos, são fontes de incertezas nas respostas do modelo. Contudo, existem duas outras fontes de incertezas, em geral não muito exploradas pelos

pesquisadores envolvidos no desenvolvimento das técnicas de otimização, que são a função objetivo selecionada, e o comprimento do registro de dados utilizados na calibração dos parâmetros.

II.2.4.1- Função Objetivo Adotada na Otimização Automática dos Parâmetros

Não só os modelos devem ter suas estruturas desenvolvidas para os propósitos específicos de cada simulação, mas também a escolha da função objetivo deve ser apropriada às simulações. A função objetivo desempenha um importante papel durante a fase de calibração, uma vez que o seu valor implica em manter ou rejeitar os valores dos parâmetros, a cada iteração. Neste aspecto, CLARKE¹² afirmou que:

" Opponents of the method of parameters estimation by minimizing an objective function argue that, although the fitting procedure may not be subjective, as with the trial-and-error method, the choice of objective function is".

Algumas funções objetivo já foram utilizadas em simulações com diferentes propósitos, porém poucos foram os estudos efetuados para verificar o ajuste de tais funções às finalidades das simulações.

CANEDO^{10;11} realizou testes específicos com quatro funções objetivo comumente usadas nos modelos conceituais hidrológicos, e concluiu que a forma da função objetivo afeta os valores dos parâmetros ajustados ao modelo conceitual, em face dos propósitos da simulação.

Denominando por OF_i, i=1, ...4, as funções objetivo testadas, e representando por Q_t^o e Q_t as descargas observadas e simuladas pelo modelo, referentes ao tempo t, como a seguir:

$$OF1 = \sum_t (Q_t^o - Q_t)^2$$

$$OF2 = \sum_t \left(\frac{1}{Q_t^o} - \frac{1}{Q_t} \right)^2$$

$$OF3 = \sum_t \left(\frac{Q_t^o - Q_t}{Q_t^o} \right)^2$$

$$OF4 = \sum_t (\log Q_t^o - \log Q_t)^2$$

Obteve que, se for requerido um modelo para simulações de vazões altas, a função OF1 é a mais indicada. Por outro lado, a forma da expressão OF2 poderá conduzir a melhores ajustes nas simulações com descargas de baixas magnitudes. No caso de não ser requerida uma maior ênfase nas descargas altas ou baixas, então as funções objetivo OF3 e OF4 são adequadas à calibração.

Embora as funções apresentadas sejam simples, os resultados indicam o quanto é importante a sua escolha relacionada com os propósitos da simulação a ser efetuada. Contudo, os mesmos propiciam um embasamento para a seleção da função objetivo em relação aos propósitos da simulação, não se tornando uma escolha subjetiva como afirma CLARKE¹².

II.2.4.2- Comprimento do Registro de Dados Necessário para Calibração do Modelo

Na literatura, o trabalho desenvolvido por CANEDO¹⁰ talvez seja o único que realmente tenha pesquisado o problema do efeito do comprimento do registro de dados na fase de calibração do modelo. A priori deste trabalho só era conhecido o comentário devido a LINSLEY e FRANZINI³⁶, como expresso abaixo, porém destituído de testes específicos que caracterizassem a influência do número de anos de dados considerado durante o ajuste dos parâmetros do modelo.

" In general, a good calibration can be obtained with 3 to 5 years of data".

Durante a fase de calibração dos dados de entrada é extraída a informação necessária para avaliar os valores dos pa
râmetros, que permite ao modelo simular a bacia estudada satis
fatoriamente. Se apenas uma pequena quantidade dos registros é
fornecida, não devem ser esperadas respostas com uma grande pre
cisão quando comparadas com os valores reais observados.

CANEDO^{10;11} utilizando uma metodologia similar àquela
do estudo das funções objetivo, pesquisou a influência, na fase
de calibração, de diferentes comprimentos de registros de dados,
em específico 1, 3, 5, 7 e 10 anos de dados de entrada. Também,
qual a influência da função objetivo adotada no modelo, sobre o
comprimento ideal para a fase da calibração.

Concluiu que um comprimento de 3 anos do registro de
dados de entrada para a calibração do modelo, é uma escolha bas
tante adequada. Porém, quando requerida uma maior precisão nos
resultados, é recomendado o ajuste com 5 anos de dados. Um ga
nho na precisão é obtido para registros maiores do que 5 anos,
contudo, em geral pequeno quando comparado ao maior trabalho
de análise e consistência dos dados, e gasto computacional en
volvido.

Uma conclusão importante dos testes realizados no ci
tado trabalho, foi a verificação de que diferentes funções obje
tivo reagem de forma distinta a incrementos no comprimento dos
registros utilizados. Entre as funções adotadas, por exemplo, a
denominada OF1 mostrou-se a mais sensível a mudanças no compri
mento do registro utilizado.

II.3- ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DAS CHEIAS

As descargas dos rios e, principalmente, as vazões das
cheias tem sido medidas e utilizadas nos projetos de estruturas
hidráulicas, bem como no planejamento e construção de obras pa
ra o controle das enchentes. A frequência de ocorrência, o ní
vel máximo atingido, o volume total, a área inundada, e a dura
ção da cheia, são fatores de grande importância nos projetos.
O U.S. WATER RESOURCES COUNCIL⁶⁰, expressou a incerteza associa

da a este fenômeno, por:

" There is no procedure or set of procedures that can be adopted which, when rigidly applied to the available data, will accurately define the flood potencial of any given watershed".

A análise da frequência das cheias segue duas principais correntes, os denominados métodos diretos, e os de cálculo indireto das vazões correspondentes a um específico período de retorno. Os métodos indiretos utilizam-se dos dados básicos das bacias hidrográficas em modelos matemáticos, para a simulação dos hidrogramas verificados nas mesmas. Em geral, tais modelos após a fase de calibração às condições peculiares de cada bacia, são usados na geração de séries sintéticas de vazões, cujos comprimentos refletem o período de retorno da cheia requerida.

Com tal metodologia é possível ajustar uma distribuição de probabilidade ao conjunto formado pelos máximos de cada uma das várias séries geradas, os quais possuem um período de retorno idêntico ao da vazão de cheia procurada. Por conseguinte, é viável o estabelecimento dos limites de confiança no valor médio do conjunto dos máximos obtidos.

As principais críticas a tais métodos surgem do fato de que a maioria dos modelos matemáticos utilizados, não conseguem gerar, sucessivamente, vazões altas e valores baixos das mesmas, tendo como tendência um bom ajuste nos valores médios observados. Além disso, como expresso por KITE³³, estes métodos são viáveis para a geração de séries de vazões médias mensais e até diárias, porém no caso da necessidade de valores de vazões referentes a menores intervalos de tempo, não é aconselhável a aplicação desta metodologia.

Os métodos diretos utilizam-se do histórico de vazões observadas para a elaboração do conjunto de valores extremos, que serão considerados para o cálculo da cheia referente ao período de retorno requerido.

São válidas duas formas de obtenção do conjunto de valores extremos a partir dos registros históricos disponíveis, a denominada série anual, e a série de duração parcial dos eventos máximos. A série anual é obtida através da seleção dos máximos valores observados em cada ano do registro, ou seja, a série é formada por um único valor de cada ano dos dados.

Tal fato constitui-se para muitos pesquisadores, numa desvantagem desta técnica, pois o segundo, terceiro, etc, maiores valores de um ano em particular, podem ser superiores ao máximo de um ou mais outros anos do histórico, e pelo processo de seleção utilizado tais valores não são levados em consideração.

Esta desvantagem é em parte remediada no método das séries de duração parcial, no qual outros valores observados, não necessariamente apenas os máximos anuais, são incluídos na análise. Estes valores são selecionados a partir de uma magnitude de vazão básica de tal forma que, ou pelo menos um evento de cada ano é incluído na série de valores extremos resultante, ou o total de valores selecionados não exceda o número total de anos do registro.

Convém ressaltar que, cada evento para ser incluído nas séries de duração parcial deve ser isolado e distinto. A inclusão de dois ou mais valores consecutivos de vazões, cuja origem seja o mesmo evento meteorológico, não é válida, resultando neste caso na seleção do máximo entre tais valores. Após a obtenção de todos os valores referentes ao registro de dados disponível, seguindo a metodologia exposta, é feita uma ordenação dos mesmos, independente do ano que tenham ocorrido, resultando, finalmente, numa série composta pelos "n" máximos valores da amostra, onde "n" é função do critério de seleção dos eventos.

Porém, como o período de retorno, para um evento de uma dada magnitude é definido como o período médio de tempo entre duas ocorrências de eventos com magnitudes iguais ou superiores, no método das séries de duração parcial, não é possível uma associação entre tal conceito e os valores da série. Isto é uma desvantagem em relação ao método das séries dos máximos anuais que permite obter os intervalos de recorrência das diversas cheias.

A decisão do uso das séries anuais ou de duração parcial depende, principalmente, dos objetivos da análise da frequência das cheias, num específico projeto.

FULLER²¹, em 1914, foi o pioneiro na aplicação dos métodos de frequência na estimação das cheias. Numerosas e distintas distribuições de frequência, ou probabilidade, foram desenvolvidas e utilizadas em diversas bacias hidrográficas de todo o mundo. Contudo, até o presente, não existe uma uniformidade nas distribuições adotadas e conseqüentemente, nos resultados obtidos.

Vários estudos foram realizados em busca da distribuição ideal, que pudesse vir a ter seu emprego proposto à todos os projetos. Dentre tais estudos devem ser destacados o realizado pelo WATER RESOURCES COUNCIL^{59,60} e o do N.E.R.C.⁴³.

O primeiro, desenvolvido nos Estados Unidos em 1967, embora concordando com as limitações no campo da análise da frequência das cheias, recomendou a utilização da distribuição LOG-PEARSON tipo III. Concluindo, ainda, que o emprego de outras distribuições seria válido, desde que houvesse uma justificativa adequada do seu uso.

BENSON⁷ em 1968, com a finalidade de fornecer subsídios a recomendação feita pelo W.R.C., ajustou diversas distribuições a 10 (dez) amostras de vazões de cheias, provenientes de postos fluviométricos com observações de longo período. Algumas das distribuições utilizadas foram a GAMA-2 parâmetros, a GUMBEL, a distribuição LOG-GUMBEL, a LOG-NORMAL, a LOG-PEARSON tipo III, e o método de HAZEN. O critério de avaliação do ajuste obtido com as distribuições testadas foi baseado no desvio relativo entre a vazão prevista e a observada. Sua conclusão foi favorável a distribuição LOG-PEARSON tipo III, embora os resultados obtidos no trabalho com a distribuição LOG-NORMAL e o método de HAZEN, também apresentassem bons ajustes.

O trabalho elaborado na Inglaterra (N.E.R.C.⁴³) adotou sete distribuições de probabilidades comumente empregadas

nos estudos das cheias, as distribuições GUMBEL GENERALIZADA (GEV), GUMBEL, GAMA, LOG-GAMA, PEARSON tipo III, LOG-PEARSON tipo III e LOG-NORMAL. O ajuste de tais distribuições às amostras de dados selecionadas foi feito com 6 (seis) diferentes índices para a medição dos afastamentos obtidos.

O trabalho recomenda a adoção da distribuição de valores extremos generalizada, conhecida como "GUMBEL GENERALIZADA", sempre que forem disponíveis registros históricos superiores a 25 anos. Entretanto, deve ser ressaltado que a distribuição LOG-PEARSON tipo III conseguiu melhores resultados em quatro dos seis índices, ficando em segundo lugar nos dois restantes.

Para registros de comprimentos menores, indicou o uso da distribuição GUMBEL tipo I. Tais conclusões basearam-se, talvez, na regularidade das distribuições recomendadas, perante todos os índices de ajustamento utilizados.

REICH⁵¹ num estudo de comparação entre as distribuições GUMBEL e LOG-PEARSON tipo III, obteve as seguintes conclusões:

"Appraisal of plotted observed floods on 83 Pennsylvania small watersheds showed a preference for the LOG-PEARSON type III frequency curves. Problems of sampling variations in the skewness of the logs, on which this distribution's curvature depends, make it less desirable than the GUMBEL for extrapolation for long return periods. The older straight line fitting is less severely influenced by high outliers".

WALLIS⁶⁵ desenvolveu um trabalho no qual aponta alguns problemas no emprego indiscriminado da distribuição LOG - PEARSON tipo III, recomendando a pesquisa de outras alternativas para os países que ainda não tenham uniformizado o procedimento da análise da frequência das cheias.

Pode-se considerar duas principais fontes de incertezas no uso de distribuições de frequência para estimar a magnitude dos eventos. A primeira está na escolha da distribuição a ser utilizada, dentre as várias existentes, uma vez que a "verdadeira" distribuição não é

conhecida. Não se tem conhecimento a priori da distribuição de probabilidades que é seguida pelos eventos em estudo.

Tal fato assume uma grande importância em função dos dados disponíveis serem, em geral, relativos aos valores centrais da distribuição de probabilidade, isto é, relativos a baixos períodos de retorno. Enquanto que as previsões são, usualmente, requeridas para grandes períodos de retorno, ou seja, baixas probabilidades de ocorrência.

Embora este problema não seja totalmente resolvido, é comum nos projetos o ajuste de diversas distribuições a amostra de dados, e através de testes específicos (QUI-QUADRADO, KOLMOGOROV-SMIRNOV, etc), verificar qual das distribuições possui um melhor ajuste à configuração dos registros disponíveis. No entanto, não se pode afirmar que a distribuição assim escolhida seja aquela que forneça melhores resultados para grandes extrapolações. Considerando conhecida a verdadeira distribuição de probabilidade da população dos dados, nada impediria que uma outra distribuição propiciasse um melhor ajuste a um curto registro de dados desta população.

A outra fonte de incertezas surge após a seleção da distribuição, qual seja, a determinação dos parâmetros de tal distribuição. Os parâmetros estatísticos das funções de probabilidade comumente utilizadas são estimados, principalmente, por dois métodos. Denominados Método dos Momentos e da Máxima Verossimilhança, são descritos no apêndice deste trabalho.

CAPÍTULO III

MODELOS E PREMISSAS ADOTADAS NO TRABALHO

Neste capítulo é feita a apresentação dos modelos matemáticos, com as respectivas metodologias de cálculo, utilizados nas diversas etapas desta pesquisa. Além disso, são enunciadas as premissas e simplificações adotadas durante o desenvolvimento do trabalho, tendo em vista os objetivos a serem alcançados.

Na descrição deste capítulo, procurou-se seguir a sequência natural das etapas abordadas durante o desenvolvimento do trabalho. Sendo que, em função dos propósitos desta pesquisa, este capítulo foi dividido em três principais seções:

III.1 - Geração da População de Dados Necessários

III.2 - Modelo Utilizado na Extensão dos Registros Fluviométricos

III.3 - Metodologia de Previsão da Magnitude das Cheias

III.1- GERAÇÃO DA POPULAÇÃO DE DADOS NECESSÁRIOS

Sendo o objetivo principal desta pesquisa verificar a importância do uso de modelos matemáticos na extensão dos registros fluviométricos, com a finalidade de obter previsões mais confiáveis nas magnitudes das cheias calculadas. A existência de uma população de registros observados, que possa servir como base de comparação aos resultados obtidos nas simulações, é de grande importância.

Contudo, os registros históricos disponíveis, não só no BRASIL como na maioria dos países, provém dos últimos 50 ou 60 anos. Por esta razão, selecionar uma população de registros para fazer previsões de cheias, principalmente, de baixa probabilidade de ocorrência, isto é, cheias associadas a altos períodos de retorno, é bastante difícil.

Para sobrepujar esse impasse, optou-se pela utilização de modelos matemáticos capazes de fornecer uma população de registros, extensa o suficiente para o desenvolvimento dos estudos necessários a esta pesquisa.

A escolha do tamanho desta população, baseou-se nas seguintes premissas:

- a) É objetivo dessa pesquisa estudar as variações nas previsões das magnitudes das cheias referentes, por exemplo, a 50, 100 e 1000 anos de período de retorno. Existe a necessidade de uma população que forneça os valores "verdadeiros" de tais previsões.
- b) Estipulou-se em 10 e 30 anos os comprimentos dos registros de dados a serem utilizados nas previsões, logo, é recomendável que a população possa ser, totalmente, subdividida em períodos com tais comprimentos.
- c) A quantidade de memória computacional necessária para a armazenagem de uma população de dados de chuvas e descargas diárias é um fator que limita o número de anos que virão a compor tal população.

Pesando todos estes fatores, foi estipulada em 900 anos a população de dados diários, base para este trabalho. Este total de anos se ajusta às premissas adotadas, possibilitando, por exemplo, a divisão do mesmo em 30 arquivos contendo, cada um, os registros correspondentes a 30 anos da amostra gerada.

A geração da população de registros diários através de modelos matemáticos necessita de dois modelos distintos, o primeiro para a geração das chuvas e o segundo que, utilizando como dados de entrada tais chuvas, fornecerá as vazões correspondentes para uma bacia hidrográfica específica.

- a) Tendo em vista o objetivo desta pesquisa, é importante que para a geração dos 900 anos de vazões diárias, seja adotado um modelo diferente daquele que será, posteriormente, utilizado na extensão dos registros, para possibilitar a comparação dos resultados obtidos.
- b) A bacia hidrográfica de referência não precisa, necessariamente, ser real. Uma "bacia hidrográfica" resultante dos valores fornecidos aos parâmetros do modelo chuva - vazão adotado, produzirá para as chuvas, um conjunto de respostas bastante viável para as análises e comparações a serem feitas, após a extensão dos registros fluviométricos.

III.1.1- Geração da Chuva

Na geração das precipitações diárias adotou-se o modelo desenvolvido por KELMAN³². Este modelo representa o fenômeno "chuva", que é intermitente e dotado de uma certa persistência, através de um processo estocástico autorregressivo, linear, de primeira ordem.

A escolha de tal modelo deveu-se, entre outras razões, ao fato do mesmo procurar reproduzir as sequências de eventos críticos observados através da sua formulação. Isto é de grande importância para esta pesquisa, que pretende estudar as magnitudes das cheias geradas para diferentes períodos de retorno.

III.1.1.1- Desenvolvimento Matemático do Modelo KELMAN

Assumindo que um processo estocástico (Z_t) possa ser representado por um modelo autorregressivo de primeira ordem, e além disso, admitindo que a sua distribuição marginal seja normal, pode-se escrever:

$$Z_t = \mu + \rho (Z_{t-1} - \mu) + \sigma \sqrt{1 - \rho^2} \xi_t \quad (\text{III.1})$$

onde:

$Z_t \approx N(\mu, \sigma^2)$ - modelo estocástico autorregressivo de primeira ordem, que segue a distribuição normal

$\xi_t \approx N(0,1)$ - Variável independente aleatória que segue uma distribuição normal padrão

Tal processo não representa obviamente um fenômeno intermitente, como a chuva, dado que possui valores negativos. Para eliminar a possibilidade de ocorrência de tais valores negativos, pode-se imaginar um outro processo (y_t) definido como a seguir:

$$\begin{aligned} y_t &= z_t, \text{ se } z_t > 0 \\ y_t &= 0, \text{ se } z_t \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Tal processo (y_t) pode ser considerado como uma amostra "censurada" de Z_t , na qual os valores de Z_t num determinado intervalo não são conhecidos. Por exemplo, todos os valores de y_t que representem observações nulas ou negativas, e portanto, desconhecidas de Z_t . O intervalo $(-\infty, 0)$, neste caso, representa o intervalo no qual os valores de Z_t estão "censurados".

Porém, se não forem apenas "censurados", mas não considerados os valores negativos de Z_t , a amostra resultante passa a ser conhecida pela denominação "truncada". O processo y_t , que representa a amostra "truncada" de Z_t , é intermitente e dotado de um mecanismo de persistência.

Resta, portanto, estabelecer se tal mecanismo de persistência é apropriado para a modelagem do fenômeno "chuva". Além disso, se a distribuição marginal das observações positivas de y_t , representada por $P(y_t < y / y_t > 0)$, se ajusta a distribuição da amostra.

Kelman provou, no seu trabalho, que no caso de serem analisadas apenas as observações positivas do processo, as mesmas são caracterizadas por uma alta assimetria, superior àquela obtida com a distribuição, por ele denominada, "normal trun-

cada", isto é, a função de distribuição acumulada da normal padrão ($\Phi(\cdot)$), podendo-se escrever:

$$P(Y < y) = \frac{\Phi\left[\frac{(y-\mu)/\sigma}{\Phi[\mu/\sigma]}\right]}{\Phi[\mu/\sigma]} : I_{(0,\infty)}(y) \quad (\text{III.3})$$

Os valores positivos do processo Y_t podem ser considerados como uma amostra da "normal truncada".

Contudo, o processo \bar{Y}_t ainda não satisfaz o propósito de representar o fenômeno "chuva". Nota-se a necessidade de alguma transformação para ajustar, da melhor forma possível, o processo de geração aos registros de precipitação observados.

Kelman observou, pela análise dos histogramas referentes a precipitações diárias, que tanto a distribuição "normal truncada" como a exponencial negativa não produziam bons ajustes a forma de tais histogramas, necessitando-se de uma distribuição cuja função de densidade fosse assintótica, isto é:

$$\lim_{x \rightarrow 0} f_x(x) = \infty \quad (\text{III.4})$$

Para alcançar tal objetivo, propôs uma transformação ou "filtro" para o processo \bar{Y}_t , a saber:

$$x_t = \bar{Y}_t^{1/\alpha}, \quad \alpha \in \mathbb{R} \quad (\text{III.5})$$

onde:

\mathbb{R} - conjunto dos números reais

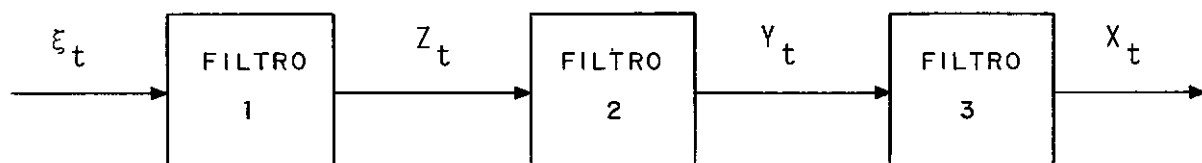
Logo, a distribuição marginal das observações positivas do processo x_t será representada por:

$$f_x(x) = \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\Phi(\mu/\sigma)\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{x^\alpha - \mu}{\sigma}\right\} I_{(0,\infty)}(x) \quad (\text{III.6})$$

sendo, para $\alpha < 1$, $\lim_{x \rightarrow 0} f_x(x) = \infty$, como desejado.

$$x \rightarrow 0$$

Logo, o modelo proposto por Kelman para representar um fenômeno intermitente, tal como a chuva, pode ser representado como abaixo:



sendo:

ξ_t - variável independente aleatória que segue uma distribuição normal padrão

z_t - $\mu + \rho (z_{t-1} - \mu) + \sigma \sqrt{1-\rho^2} \xi_t$

y_t - $z_t I_{(0, \infty)}(z_t)$

x_t - $y_t^{1/\alpha}$

$\mu, \sigma, \rho, \alpha$ - parâmetros do modelo

μ - média da amostra

σ - desvio padrão da amostra

ρ - coeficiente de correlação da amostra

α - parâmetro de escala da amostra

A estimação dos parâmetros μ , σ , ρ e α do modelo, para uma amostra de dados, será feita segundo o Método da Máxima Verossimilhança. Contudo, como exposto por Kelman, neste caso particular, uma solução analítica direta do método é de difícil obtenção. Várias tentativas foram feitas para a obtenção de uma solução aproximada do problema, porém sem muito sucesso.

Para contornar tal dificuldade, foi pesquisada a solução de um problema aproximado, com a finalidade de poder ser obtida uma solução viável para o verdadeiro problema, como exposto por KELMAN³²:

"The experience obtained on generated series, i.e., in such situations that "population" parameters were known, supports the results obtained under the above simplifying approximation".

A aproximação utilizada resultou em buscar os parâmetros da distribuição assumindo que os pares de valores (X_1, X_2) , (X_3, X_4) , (X_5, X_6) , ... fossem independentes. Em face do problema simplificado adotado, a estimação dos parâmetros fica reduzida a avaliação em uma distribuição bivariada. Supondo uma amostra (X_t, X_{t+1}) , $t = 1, 2, 3, \dots, n$, a ser avaliada, podem ser de finidos três eventos viáveis de ocorrência, quais sejam:

$$A_{1t} = \{X_t = 0; X_{t+1} = 0\}$$

$$A_{2t} = \{X_t = x_t; X_{t+1} = y_t\}$$

$$A_{3t} = \{X_t = z_t; X_{t+1} = 0\} \text{ ou } \{X_t = 0; X_{t+1} = z_t\}$$

onde:

$$0 < x_t, y_t, z_t$$

Se, além disso, for considerada uma ocorrência n_1 , n_2 e n_3 , com $n = n_1 + n_2 + n_3$ (n = comprimento da amostra), para cada um dos eventos A_{1t} , A_{2t} e A_{3t} , então a função de verossimilhança será escrita:

$$L(\mu, \sigma, \rho, \alpha) = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3!} [P(A_{1t})]^{n_1} \prod_{t=1}^{n_2} P(A_{2t}) \prod_{t=1}^{n_3} P(A_{3t}) \quad (\text{III.7})$$

Explicitando a expressão (III.7) resulta:

$$\begin{aligned} \log L = LL(\mu, \sigma, \rho, \alpha) = & C + n_1 \log \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) \left[\phi\left(\frac{-\mu - \sqrt{\rho}\sigma t}{\sqrt{1-\rho}}\right) \right]^2 dt \\ & + (2n_2 + n_3) \log \frac{\alpha}{\sigma} - n_2 \left[\frac{\log(1-\rho^2)}{2} + \frac{\mu^2}{(1+\rho)\sigma^2} \right] \\ & + \sum_{t=1}^{n_2} \left[(\alpha-1) \log(xy) + \frac{2\mu(1-\rho)(x^\alpha + y^\alpha) - (x^{2\alpha} + y^{2\alpha}) + 2\rho(xy)^\alpha}{2(1-\rho^2)\sigma^2} \right] \\ & + \sum_{t=1}^{n_3} \left[(\alpha-1) \log z + \log \phi \left[\frac{-\rho z^\alpha - \mu(1-\rho)}{\sigma\sqrt{1-\rho^2}} \right] + \log \phi \left(\frac{z^\alpha - \mu}{\sigma} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

sendo C uma constante

Pelo método da Máxima Verossimilhança, o vetor $\hat{\underline{\theta}} = (\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\rho}, \hat{\alpha})$ estimado, tem de resultar num máximo quando aplicado à função de verossimilhança, ou ao seu logaritmo (expressão (III.8)). Se a função (LL) determinada for côncava, como neste caso, é suficiente a busca de um máximo local, pois o mesmo será, também, o máximo global.

Logo, dado que é condição necessária para um ótimo local, que as derivadas de primeira ordem da função sejam nulas quando aplicadas ao vetor $\hat{\underline{\theta}} = (\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\rho}, \hat{\alpha})$, torna-se, portanto, bastante estimar tal ponto em relação a expressão (III.8). Isto pode ser obtido de uma forma iterativa através do algoritmo de Newton-Raphson, a saber:

$$\underline{\hat{\theta}}_J = \underline{\hat{\theta}}_{J-1} - (H^{-1} \cdot \underline{D}') \underline{\hat{\theta}}_{J-1} \quad (\text{III.9})$$

sendo:

$\underline{\hat{\theta}}_J$ - a j-ésima estimação do vetor $\hat{\underline{\theta}}$ procurado, que tornará nulas as derivadas da 1.^a ordem da função LL.

$\underline{\hat{\theta}}_{J-1}$ - a estimação anterior do vetor $\hat{\underline{\theta}}$.

H^{-1} - representa a inversa da matriz Hessiânica da função LL, onde H é composto como abaixo:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 LL}{\partial \mu^2} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \mu \partial \sigma} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \mu \partial \rho} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \mu \partial \alpha} \\ & \frac{\partial^2 LL}{\partial \sigma^2} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \sigma \partial \rho} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \sigma \partial \alpha} \\ & & \frac{\partial^2 LL}{\partial \rho^2} & \frac{\partial^2 LL}{\partial \rho \partial \alpha} \\ & & & \frac{\partial^2 LL}{\partial \alpha^2} \end{bmatrix}$$

$\underline{D'}$ - vetor das derivadas da função LL em relação aos parâmetros do modelo, ou seja:

$$\underline{D'} = \begin{bmatrix} \frac{\partial LL}{\partial \mu} \\ \frac{\partial LL}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial LL}{\partial \rho} \\ \frac{\partial LL}{\partial \alpha} \end{bmatrix}$$

As derivadas de primeira e segunda ordem da função LL, necessárias à resolução de (III.9), são apresentadas no Apêndice A da referência (KELMAN³²).

III.1.1.2-Dados Utilizados na Geração das Chuvas

Uma vez determinados os parâmetros do modelo, a geração dos registros de chuva, com qualquer comprimento, é facilmente obtida segundo a metodologia exposta. A variável independente aleatória, normal padronizada, ξ_t , poderá ser obtida através de uma das diversas rotinas, em geral, já implantadas nos sistemas computacionais.

Na determinação dos parâmetros μ, σ, ρ e α , duas alternativas foram estudadas, quais sejam: a) obter um registro histórico de precipitações diárias de algum posto pluviométrico brasileiro, para servir de base a geração dos 4 parâmetros; b) obter um registro histórico para a avaliação do parâmetro μ e fixar os demais segundo os valores médios do trabalho de KELMAN ($\sigma = 1,0$; $\rho = 0,4$ e $\alpha = 0,6$).

Embora, para os objetivos desta pesquisa, não seja relevante para a geração dos dados tomar por base uma específica bacia hidrográfica ou região, optou-se pela alternativa da seleção de um registro histórico em um posto pluviométrico brasileiro, extenso o suficiente para a estimação dos parâmetros do modelo.

Selecionou-se os registros do posto de Caixa D'Água (1955-1965) pertencente ao município de Aparecida do Norte, estado de São Paulo, como posto base para a determinação dos parâmetros μ , σ , ρ e α do modelo. Esta escolha deveu-se aos seguintes fatos:

- a) Tal posto apresenta a sazonalidade representativa da região sudeste do Brasil, isto é, possui para o período Novembro/Abril maiores índices pluviométricos (período "chuvoso") do que no período Maio/Outubro (período "seco").
- b) Neste posto são também registrados os totais de evaporação média mensal, que foram, posteriormente, adotados no modelo de geração das descargas diárias. Pela simples observação da pequena variação nos totais de evaporação medidos, pode-se tomar como uma hipótese viável a consideração de um ano padrão de evaporação, sendo o mesmo ciclicamente repetido durante a geração da população de descargas desta pesquisa.
- c) Os totais de precipitação e evaporação observados no posto, cujas faixas de variação foram de 1600 a 2000 mm e 1100 a 1200 mm, respectivamente, no período 1955-1965 analisado, foram considerados bastante significativos para os propósitos deste trabalho.

QUADRO Q.III.1 - PARÂMETROS DO MODELO DE GERAÇÃO DAS CHUVAS DIÁRIAS

PERÍODO DO ANO	PARÂMETROS			
	μ	σ	ρ	α
JANEIRO/FEVEREIRO	-0,1305	0,7207	0,1233	0,9714
MARÇO/ABRIL	-0,1382	0,7118	0,1310	0,7695
MAIO/JUNHO	-0,2859	0,7320	0,5179	0,9190
JULHO/AGOSTO	-0,6931	1,0258	0,0795	0,6698
SETEMBRO/OUTUBRO	-0,1190	0,6744	0,1549	1,2104
NOVEMBRO/DEZEMBRO	-0,2172	0,7422	0,2317	0,7666

A determinação dos parâmetros para períodos de dois meses, deveu-se aos resultados satisfatórios obtidos nos testes realizados com a amostra de dados. Durante os testes, verificou-se a persistência no tempo e a estacionaridade do processo, além da hipótese de dependência ou independência das séries geradas a partir dos parâmetros estimados, para com isto aceitar ou rejeitar as mesmas.

III.1.2- Geração das Descargas Diárias

Com a finalidade da obtenção dos registros das vazões diárias referentes às precipitações geradas, utilizou-se uma versão de um modelo conceitual determinístico, para a simulação dos processos suscetíveis de ocorrer em uma bacia hidrográfica, denominado STANFORD WATERSHED MODEL IV (CRAWFORD e LINSLEY¹⁴).

A seleção de tal modelo, que passará a ser referido por SWM-IV, deveu-se ao fato do mesmo ser um modelo bastante divulgado e com inúmeras aplicações práticas já realizadas com bons resultados.

A figura (F.III.1) a seguir, apresenta a estrutura lógica do modelo, com as interligações existentes entre os diversos processos do mesmo. A formulação matemática adotada no SWM-IV para a representação dos diversos processos ou fases do ciclo hi-

hidrológico (evaporação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, etc.), que a partir da precipitação influenciam na vazão resultante, é de sobremaneira conhecida e divulgada tanto na literatura internacional como na brasileira (CRAWFORD e LINSLEY¹⁴; VIESMAN et al⁶³; BRAGA⁹, etc.). Por tal razão, será a mesma abstraída de apresentação neste trabalho.

Contudo, julga-se ser de interesse a apresentação do conjunto de parâmetros adotados no modelo, que tem por finalidade de tanto a interação dos diversos processos hidrológicos como a representação das características da bacia hidrográfica de projeto.

A versão do SWM-IV adotada possui 24 parâmetros, apresentados no quadro (Q.III.2) a seguir, com os valores atribuídos aos mesmos.

Como já exposto, este trabalho não tomou uma bacia hidrográfica específica por base, mas sim caracterizou uma "bacia" através dos valores fornecidos aos parâmetros do modelo. Contudo, procurou-se garantir que as respostas produzidas, isto é, as vazões diárias geradas a partir dos dados de entrada, fossem válidas em termos hidrológicos.

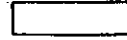
Essa coerência hidrológica. procurou-se obter através dos valores adotados para os parâmetros do modelo. Resultaram de uma análise efetuada sobre 12 conjuntos de parâmetros calibrados e utilizados em igual número de segmentos da bacia hidrográfica do rio Tietê em São Paulo. As simulações e previsões das descargas deste rio são efetuadas pela CESP quase que diariamente, com um excelente grau de ajuste aos valores observados a posteriori.

FIGURA F.III.1 ESTRUTURA LÓGICA DO MODELO SWM-IV

LEGENDA



PROCESSOS



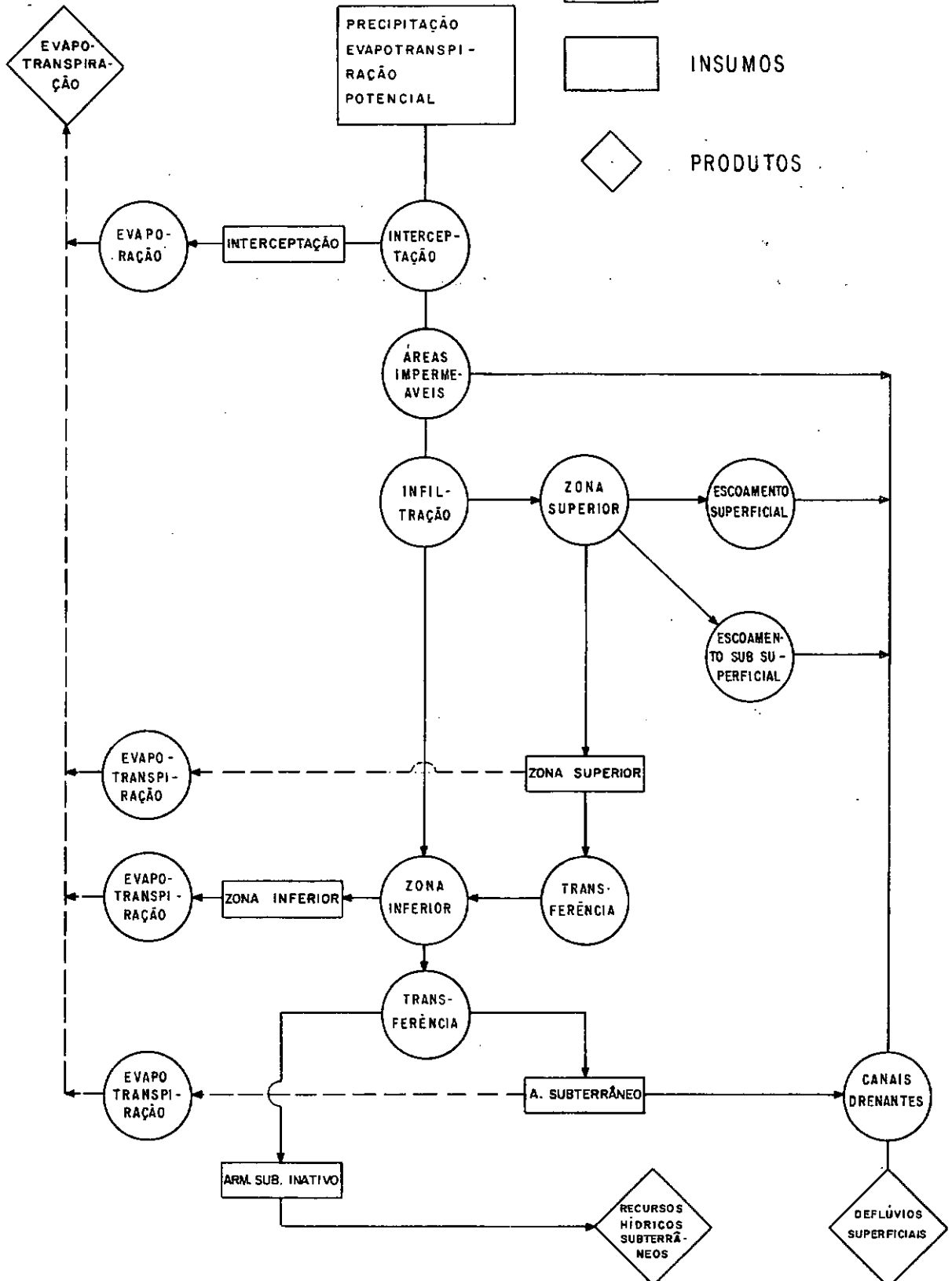
ARMAZENAMENTO



INSUMOS



PRODUTOS



QUADRO (Q.III.2) -- PARÂMETROS DO SWM-IV

Nº	PARÂMETROS	VALOR ATRIBUÍDO
1	EPXM	1,500
2	IMPV	0,100
3	CB	6,000
4	CC	1,300
5	UZSN	25,000
6	NN x L/SS ^{1/2}	281,500
7	LZSN	400,000
8	K24L	0,000
9	LIRC4	0,700
10	LKK4	0,011
11	KV x LKK4	0,000
12	SLIQ	0,001
13	TDH(1)	0,600
14	TDH(2)	0,250
15	K24EL	0,001
16	KS1	0,900
17	K3	0,400
18	SCEPI	0,000
19	UZSI	0,000
20	LZSI	400,000
21	SGWI	180,000
22	RESI	0,000
23	SRGXI	0,000
24	TDH(3)	0,100

III.1.2.1- Significado dos Parâmetros

EPXM - Parâmetro que representa a capacidade de interceptação da bacia hidrográfica, sendo função do tipo e quantidade de cobertura vegetal. Representa a lâmina, em mm, do "reservatório" de interceptação da bacia.

IMPV - Representa a fração da área total que é impermeável, contribuindo diretamente para o escoamento no canal drenante.

CB - Índice que controla a taxa de infiltração no modelo, sendo um dos parâmetros de mais difícil previsão, dado que as taxas de infiltração são bastante influenciadas pela quantidade de água armazenada tanto na superfície da bacia como no próprio solo desta. Sua unidade é o mm.

CC - Índice que controla a distribuição temporal do volume de escoamento sub-superficial da bacia no modelo.

UZSN - Parâmetro para estimativa da capacidade de armazenamento da zona superior ou "reservatório" superficial da bacia. Representa a capacidade nominal deste "reservatório", isto é, a lâmina em mm, para a qual 50% do volume de água é retido e 50% infiltra-se para a camada inferior ou solo da bacia. Este fator não é independente, sendo geralmente definido em função do índice LZSN.

$NN \times L/SS^{1/2}$ - Este parâmetro representa a relação entre o coeficiente de Manning (NN) para o escoamento superficial da bacia, sendo o mesmo função do tipo de solo; o comprimento médio do escoamento superficial direto (L), isto é, a distância média (m) que a água percorre superficialmente até atingir um canal drenante; e a declividade média (SS), em metros por metro, das superfícies de escoamento superficial direto, perpendiculares ao canal receptor.

LZSN - Parâmetro que estima a capacidade nominal de armazenamento da zona inferior ou "reservatório" inferior ou, ainda, solo da bacia hidrográfica. Representa a lâmina em mm, referente à capacidade máxima de retenção de água pelo solo, isto é, 50% do volume de água será retido e 50% será infiltrado para o "reservatório" subterrâneo quando o solo estiver com um armazenamento correspondente a LZSN.

K24L - Este índice representa a fração do escoamento subterrâneo da bacia que é drenada para bacias vizinhas. Normalmente é feito igual a zero, a não ser quando existam suspeitas de percolações profundas na bacia sendo então estimado seu valor através, por exemplo, de variações observadas nos níveis de armazenamento subterrâneo.

LIRC4 - Parâmetro que reflete a depleção do escoamento sub-superficial, isto é, representa a relação entre a descarga neste "reservatório" em qualquer instante e a descarga ocorrida 24 horas antes. É uma função da constante de depleção do "reservatório" (IRC) e do número de intervalos de tempo de cálculo do modelo a cada 24 horas. Definido pela expressão $LIRC4 = 1 - IRC^{1/t}$, onde t, por exemplo, seria igual a 96 se os ciclos de cálculo fossem a cada 15 minutos para a definição das respostas diárias pelo modelo.

LKK4 - Parâmetro que define a depleção do escoamento subterrâneo ou, também denominado, básico. Tem definição idêntica a do parâmetro LIRC4, sendo função da constante de depleção (KK24) do "reservatório" subterrâneo. É calculado pela expressão $LKK4 = 1,0 - KK24^{1/t}$, sendo t função do número de intervalos de tempo de cálculo diário no modelo.

KV x LKK4 - Esta relação é introduzida no modelo para permitir através do índice KV uma variabilidade na taxa de depleção do escoamento básico. Isto é importante para levar em conta, na estação chuvosa, a recarga dos aquíferos.

SLIQ - Este índice representa a relação entre a área de todas as superfícies líquidas (rios, lagos, etc) e a área de drenagem total da bacia hidrográfica.

TDH(1) - Este parâmetro é a primeira ordenada do histograma tempo-área da bacia. O histograma tempo-área é calculado pela planimetria das áreas entre as diversas isócronas e posterior divisão de tais áreas pela área total da bacia. Utiliza-se este histograma para representar o retardamento das vazões de entrada no canal, em qualquer instante de tempo, que multiplicadas pelos elementos sucessivos do histograma tempo-área, produzirão a hidrógrafa resposta na seção de saída da bacia.

TDH(2) - Segunda ordenada do histograma tempo-área da bacia.

K24EL - Este parâmetro representa a fração da área total da bacia hidrográfica na qual a evapotranspiração do "reservatório"

subterrâneo ocorre a nível potencial.

KSI - Índice utilizado na equação de amortecimento das vazões de entrada no canal. Entretanto, quando num intervalo de tempo qualquer a vazão de entrada for zero, KSI torna-se uma constante de recessão para a água armazenada no canal.

K3 - Parâmetro que controla a perda total por evapotranspiração da zona inferior da bacia. Seu valor é estimado em função do tipo de cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

SCEPI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" de intercepção da bacia.

UZSI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" superior da bacia.

LZSI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" inferior da bacia.

SGWI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" subterrâneo da bacia.

RESI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" de retenção superficial da bacia.

SRGXI - Parâmetro que indica o nível inicial do "reservatório" sub-superficial da bacia.

TDH(3) - Terceira ordenada do histograma tempo-área da bacia.

Convém ressaltar que a versão adotada do SWM-IV trabalha com um histograma de distribuição temporal de volumes composto por quatro ordenadas, sendo que a quarta e última é obtida pelo modelo através da simples subtração à unidade da soma das demais ordenadas, fornecidas como parâmetros do modelo.

Além disso, outro aspecto importante nesta versão, é o fato do algoritmo do modelo utilizar como intervalo de tempo de cálculo, o dia. Tal fato diferencia esta versão de algumas outras existentes que, embora também obtendo como respostas as descargas diárias em uma seção de uma bacia hidrográfica, utilizam intervalos de tempo de cálculo dos processos intervenientes

inferiores ao dia, como por exemplo, a hora ou alguma outra fração (30 min, 15 min, etc.).

Os valores gerados para as vazões diárias através do SWM-IV tem por unidade o mm/dia, isto porque os mesmos foram obtidos por unidade de área. A área de drenagem total da "bacia hidrográfica" considerada é um valor transparente para os objetivos deste trabalho.

III.2- MODELO UTILIZADO NA EXTENSÃO DOS REGISTROS FLUVIOMÉTRICOS

Contando com a população (900 anos) de precipitações e descargas diárias, surgiu a necessidade de selecionar um outro modelo matemático, diferente do SWM-IV, para obter a extensão dos registros fluviométricos visando atender aos propósitos deste trabalho.

Este segundo modelo chuva-vazão, de estrutura diferente e menos complexa (com menos parâmetros) que o primeiro, é incapaz de reproduzir perfeitamente todas as variações dos hidrogramas da população. Em outras palavras, o modelo utilizado para a extensão dos registros fluviométricos, uma vez calibrado, fornecerá tão somente estimativas das vazões "observadas".

Tendo em vista que a principal crítica aos modelos matemáticos comumente utilizados é a forma da calibração de seus parâmetros, ou seja, o método da "tentativa e erro" empregado, optou-se pela utilização de um modelo determinístico que possui uma rotina para o ajuste automático dos seus parâmetros. Foi então selecionado, entre os vários existentes, o modelo desenvolvido por CANEDO¹⁰, com base no modelo de IBBITT²⁷.

III.2.1- Características do Modelo

O modelo em questão possui uma rotina interna para o ajuste automático dos seus parâmetros, que tem por base os fundamentos teóricos desenvolvidos por ROSENBROCK⁵⁴ no seu trabalho "An Automatic Method for finding the Greatest or Least Value of a Function", os quais serão mostrados neste trabalho a posteriori.

O modelo possui um total de 12 parâmetros, apresentados no quadro (Q.III.3) a seguir, com seus respectivos valores iniciais, que tem por finalidade reproduzir as características da "bacia hidrográfica" adotada. Os valores iniciais considerados poderiam ser quaisquer, uma vez que em função do elevado número de iterações, que será realizado na busca do conjunto "ótimo" de parâmetros, tais valores não terão uma influência significativa nos resultados finais.

QUADRO Q.III.3 - PARÂMETROS DO MODELO CHUVA-VAZÃO

NÚMERO	PARÂMETROS	VALOR INICIAL ATRIBUÍDO
1	X(1)	200,000
2	X(2)	10,000
3	X(3)	195,000
4	X(4)	5,000
5	X(5)	3,000
6	X(6)	4,000
7	X(7)	40,000
8	X(8)	250,000
9	X(9)	0,900
10	X(10)	0,600
11	X(11)	0,250
12	X(12)	0,100

Isto é verificado porque a rotina automática empregada para o ajuste dos parâmetros, a partir do método de ROSENBROCK, ou seja, que tem por base o método das coordenadas circulantes para busca do "ótimo", rapidamente promove as alterações necessárias nos valores dos parâmetros do modelo.

III.2.1.1- Significado dos Parâmetros

X(1) - Este parâmetro representa o fator que controla o escoamento superficial na bacia. Possui como unidade tempo (seg.) x lâmina (mm) de escoamento.

X(2) - Índice que controla qual a parcela do escoamento superficial que torna-se volume de armazenamento superficial, isto é, que fica retido superficialmente.

X(3) - Um dos parâmetros da equação de infiltração de PHILIPS, utilizada no modelo para cálculo do volume infiltrado a cada intervalo de tempo da simulação.

X(4) - Representa a taxa mínima de infiltração potencial da equação de PHILIPS.

X(5) - Parâmetro utilizado para cálculo da transpiração do solo da bacia.

X(6) - Fator que controla a parcela do escoamento sub-superficial, que retorna ao armazenamento superficial, principalmente em função das declividades do terreno da bacia.

X(7) - Este parâmetro controla a parcela que irá percolar para o reservatório subterrâneo da bacia, isto é, a percolação profunda da mesma.

X(8) - Este índice representa a constante do armazenamento subterrâneo da bacia.

X(9) - Coeficiente que controla o escoamento no canal da bacia.

X(10) - Primeira ordenada do histograma tempo-área da bacia.

X(11) - Segunda ordenada do histograma tempo-área da bacia.

X(12) - Terceira ordenada fornecida para caracterizar o histograma tempo-área da bacia.

Convém ainda ressaltar, que o modelo divide a bacia em quatro principais "reservatórios", quais sejam; o de retenção superficial, o superior, o inferior e, finalmente, o subterrâneo. Os níveis iniciais nestes reservatórios são fornecidos como dados de entrada ao modelo, e não como parâmetros como no SWM-IV, uma vez que não carecem de uma otimização, pois representam valores observados na bacia.

Por uma questão de uniformidade, foram fornecidos os mesmos níveis iniciais empregados no SWM-IV, isto é, os valores atribuídos aos correspondentes parâmetros daquele modelo.

III.2.1.2- Estrutura das Rotinas do Modelo

O modelo adotado possui um total de 23 rotinas, cujas interligações estão expostas na figura (F.III.2) deste trabalho e que são resumidamente explicadas a seguir:

MAIN - Este é o que pode ser considerado como o programa principal do modelo, uma vez que inicializa todo o processo de otimização do mesmo, acionando para isto algumas rotinas de leitura dos dados hidrológicos e demais variáveis de entrada, necessários ao longo do desenvolvimento do modelo, bem com a rotina SUB1 que irá coordenar todo o processo.

EXTRAG - Esta rotina tem por finalidade determinar os limites ou "fronteiras" de cada um dos parâmetros. Este conceito de "fronteira" será convenientemente exposto quando da apresentação do desenvolvimento matemático do método de otimização de ROSENBROCK.

SETX - Tem a função de efetuar a leitura dos valores iniciais fornecidos para os parâmetros do modelo, além de verificar se tais valores não violam as restrições próprias de cada um dos parâmetros. Caso todas as restrições sejam respeitadas, o processo de otimização pode continuar. Contudo, ocorrendo alguma violação das restrições impostas, o conjunto de valores fornecidos é rejeitado e o processo é interrompido.

EXTRAC - Tal rotina possui uma única atribuição, qual seja, calcular o valor dos parâmetros que sejam função de outros fornecidos. Como exemplo, calcula o valor da quarta ordenada do histograma tempo x área da bacia (TDH(4)), a partir dos valores fornecidos para as três ordenadas iniciais deste histograma (parâmetros do modelo), respeitando a restrição de que a soma de todas as ordenadas seja unitária.

BDRY - Esta subrotina tem a função de comparar os valores correntes dos parâmetros com suas restrições. a cada passo do processo de otimização da função objetivo, penalizando a mesma caso ocorra a violação de alguma das restrições.

EXCON - Esta rotina que está diretamente relacionada com a subrotina BDRY, é acionada sempre que o valor de um dos parâmetros do modelo esteja infringindo a sua restrição, e portanto, fora de sua região "viável" de variação. Esta rotina realiza os ajustes necessários para modificar o parâmetro em questão, de modo que o mesmo não viole a sua restrição. Como posteriormente será exposto, a região viável de variação do valor de um parâmetro é definida pelas fronteiras inferior e superior deste.

CALCFX - Esta rotina é em síntese o modelo conceitual determinístico desenvolvido para simular o comportamento de uma bacia hidrográfica. Desenvolvida a partir da estrutura matemática constante do "DAWDY AND O'DONNELL MODEL"¹⁶, que foi um dos primeiros modelos "chuva-vazão" elaborados, representa a rotina CALCFX uma extensão do mesmo, tanto quanto ao número total de parâmetros (o modelo de referência possui nove parâmetros), como pelo fato de estar acoplada a rotina de otimização automática de tais parâmetros, sem portanto utilizar a forma da "tentativa e erro" anteriormente adotada.

REDATA - Rotina para leitura dos dados hidrológicos adotados nas simulações, isto é, os registros diários referentes às chuvas, descargas e evapotranspiração potencial.

DIFSQR - É uma função para avaliar com precisão as diferenças entre as raízes quadradas de (T) e $(T + DEL)$, onde (T) representa o tempo presente de cálculo e $(T + DEL)$ o tempo futuro (DEL é o intervalo de tempo de cálculo). Sua aplicação é vinculada aos diversos processos hidrológicos simulados matematicamente na rotina CALCFX.

RECOR - Esta rotina é utilizada para corrigir os armazenamentos nos diversos "reservatórios" da bacia a cada intervalo de tempo, dentro do processo de otimização dos parâmetros do modelo.

TOTAL - Determina os somatórios dos dados hidrológicos de entrada no modelo (precipitações, descargas, evapotranspiração potencial), para a análise do balanço hídrico da bacia, no final da simulação.

SETDX - Rotina utilizada para avaliar a propagação do escoamento através dos "reservatórios lineares" assumidos pelo modelo.

TITLE - Rotina para impressão dos cabeçalhos referentes aos dados hidrológicos utilizados no modelo.

WRITEA - Rotina para impressão dos dados hidrológicos, tanto os de entrada ao modelo como os resultantes da simulação, além dos níveis de armazenamento diários nos "reservatórios" da bacia.

SUB1 - Esta rotina controla a estratégia de otimização do método de ROSENBROCK. Em conjunto com as demais rotinas a ela acopladas, irá alterar sempre que necessário os valores dos parâmetros do modelo, visando ajustar os dados hidrológicos gerados aos observados na bacia, através de maximização (ou minimização) da função objetivo.

SCALE - Rotina que armazena, ao longo do processo de otimização, os valores reduzidos dos parâmetros do modelo, bem como os índices de redução dos mesmos. Por exemplo, reduz a valores unitários os parâmetros (consequentemente as suas restrições) do modelo, sendo os respectivos índices de redução os valores reais dos mesmos.

UNSCAL - Tal rotina tem por objetivo o inverso da anterior, ou seja, utiliza os índices de redução, anteriormente armazenados, para retornar aos valores reais dos parâmetros (idem para as restrições), armazenando tais resultados.

SUB3 - Esta rotina tem por finalidade determinar as novas direções de busca do ótimo da função objetivo adotada, tendo como premissa básica a ortogonalidade das mesmas.

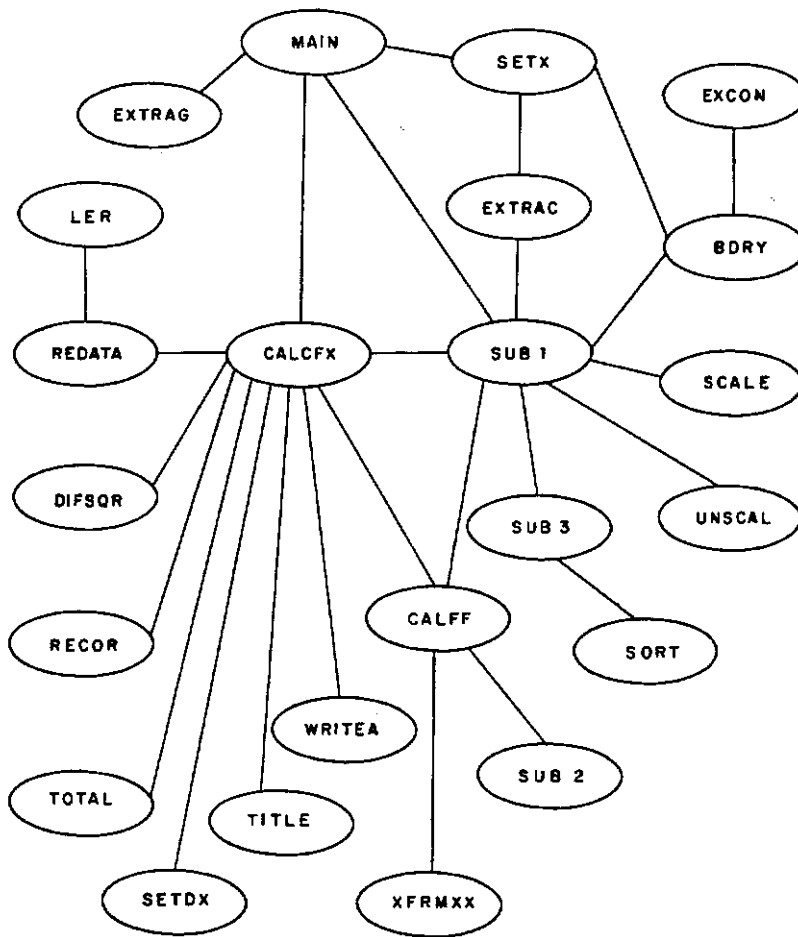
SORT - Rotina utilizada para determinar qual das novas direções de busca é mais paralela as respectivas direções anteriores, com a finalidade de ajustar a amplitude do "passo" de busca, em função dos resultados já obtidos, para cada uma das direções.

CALFF - Rotina acionada pela SUB1 para calcular, a partir de um determinado conjunto de parâmetros, as descargas geradas na CALCFX, ou, ao final de cada "estágio" do processo, acionar a rotina SUB2 para a impressão dos resultados obtidos ao longo da simulação.

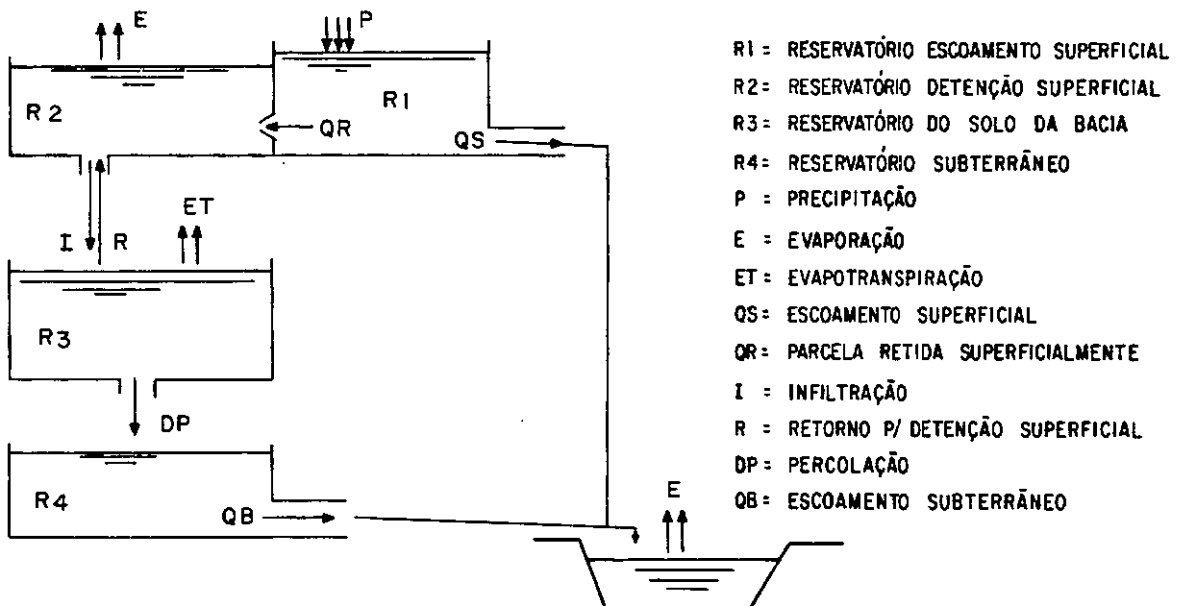
SUB2 - Subrotina de impressão ao longo do processo de otimização do modelo dos resultados parciais encontrados, tais como os diversos conjuntos de parâmetros testados, os valores da função objetivo, o número de "estágios" (este termo será explicado quando do desenvolvimento do método de ROSENBROCK) já efetuados, etc.

XFRMXX - Rotina com uma função idêntica a UNSCAL, uma vez que armazena os valores dos parâmetros, tendo por base os parâmetros reduzidos, e os respectivos índices de redução. Porém só é utilizada quando é acionada a rotina CALFF.

FIGURA F. III. 2 - ESTRUTURA DAS ROTINAS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO



CROQUIS SIMPLIFICADO DA ROTINA CALCFX



III.2.2- Desenvolvimento Matemático do Método de Rosenbrock

O problema de achar o máximo ou o mínimo de uma função surge, frequentemente, no desenvolvimento de vários projetos de engenharia, podendo ser expresso da seguinte forma:

Seja $u(x)$ uma função com n parâmetros, expressos por x_1, x_2, \dots, x_n , a ser maximizada ou minimizada, sujeita as seguintes relações:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_1 \leq h_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

(III.10)

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_2 \leq h_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

.....

$$g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_n \leq h_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$g_{n+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_{n+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq h_{n+1}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$g_{n+2}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_{n+2}(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq h_{n+2}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

.....

$$g_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq x_p(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq h_p(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

(III.11)

Em qualquer problema proposto, várias das desigualdades tipo (III.10) podem ser necessárias na formulação do mesmo, contudo algumas das relações do tipo (III.11) certamente existirão. A razão de apresentar as desigualdades (III.10) separadamente e de forma completa, ao invés de agrupá-las com as do tipo (III.11) que apresentam uma formulação mais geral, foi para excluir as possíveis soluções dúbias, ou seja, nas quais algum dos parâmetros não respeite as suas restrições. As desigualdades tipo (III.10) estabelecem a região viável de variação dos parâmetros $x_i, i=1, 2, \dots, n$, da função $u(x)$.

Independentemente das restrições impostas em (III.10) e (III.11), para determinar, por exemplo, o mínimo da função $u(x)$, deve-se trocar os valores dos parâmetros X_1, X_2, \dots, X_n visando reduzir tanto quanto possível o resultado da função $u(x)$. Embora aparentemente simples, este processo pode se tornar extremamente árduo, como no caso de existirem interações entre alguns parâmetros, principalmente quando são utilizados métodos de busca do ótimo da função como o da Busca Univariada (BEARD⁴).

Tal método reduz o valor de $u(x)$ modificando o valor de um único parâmetro, para só então passar a trocar o próximo, e assim sucessivamente, fato que induz a um excessivo gasto computacional, num processo lento em direção ao ponto ótimo procurado, no caso de uma dependência entre alguns parâmetros.

Para contornar tal dificuldade, geralmente é proposto o método da Busca por Gradiente (FLETCHER e POWELL¹⁹), que a partir das derivadas parciais da função $u(x)$, em respeito aos $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ parâmetros, obtidas analítica ou numericamente, estima qual a direção na qual $u(x)$ muda seu valor mais rapidamente.

Contudo, em alguns problemas onde, principalmente, seja verificada uma forte dependência entre dois ou mais parâmetros, não existe razão para acreditar-se numa grande vantagem da Busca por Gradiente sobre os outros métodos. Além de em alguns problemas não ser possível determinar-se as derivadas parciais da função.

ROSENBROCK⁵⁴ desenvolveu um método similar ao da Busca Univariada, diferindo em um importante aspecto, qual seja, embora também no primeiro ciclo de busca do ótimo da função $u(x)$ proceda a alteração nos valores dos $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ parâmetros por vez, a priori da iniciar um próximo ciclo é efetuada uma rotação nas direções iniciais adotadas.

Tendo por base o progresso obtido em todo o ciclo anterior, e procurando manter a ortogonalidade das n direções, não altera independentemente cada direção como o primeiro método. Da

da a sua abordagem para o cálculo do valor ótimo (máximo ou mínimo) de $u(x)$, o método de ROSENBROCK é também denominado, Método das COORDENADAS CIRCULANTES.

A alteração no valor inicial de cada um dos n parâmetros da função, ou o "passo" inicial em cada uma das n "direções" de busca, foi o primeiro problema a ser resolvido. ROSENBROCK preferiu não fixar nenhum valor arbitrário a ser adotado, podendo tomar-se qualquer "comprimento inicial" ("eo"), que ao longo do processo será alterado segundo critérios próprios do método, como exemplificado a seguir.

Por exemplo, para o caso da minimização da função $u(x)$, define-se como um "sucesso" o fato da alteração "eo" imposta a um determinado parâmetro X_i da função, resultar em um valor para $u(x)$ inferior ao anterior. Em caso contrário, considera-se como um "insucesso" a alteração "eo" na direção X_i . ROSENBROCK convencionou adotar-se $e_1 = \alpha \cdot e_0$, com $\alpha > 1$, sempre que fosse obtido um sucesso na direção do parâmetro X_i com a alteração inicial, e fazer $e_1 = -\beta \cdot e_0$, com $0 < \beta < 1$, no caso de um insucesso.

Raciocínio análogo deve ser aplicado para todas as n direções da função $u(x)$, sempre que um novo passo " e_j " for requerido, isto é, $e_j = \alpha \cdot e_{j-1}$ ou $e_j = -\beta \cdot e_{j-1}$ dado um sucesso ou não no passo anterior da referida direção.

ROSENBROCK denomina cada "passo" e_j numa determinada direção de busca, por "tentativa". A cada variação em um dos parâmetros do modelo, é determinado o valor da função $u(x)$, para avaliar-se se a "tentativa" foi um sucesso, portanto indicando que a direção deve ser mantida ou, no caso de um insucesso, originando a troca da direção de busca. Denominou por "estágio" ao total de "tentativas" efetuadas com um conjunto de direções de busca do ótimo da função objetivo. As subseqüentes trocas nas direções (rotina SUB3) dão início a um novo "estágio" do processo.

Caracterizando por ξ_i , $i = 1, 2, \dots, n$ ao conjunto das n direções de busca, o procedimento idealizado para determinar

as novas direções, que caracterizou o segundo problema a ser resolvido por ROSENBROCK, pode ser sintetizado como a seguir:

seja:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= d_1 \xi_1^0 + d_2 \xi_2^0 + \dots + d_n \xi_n^0 \\
 A_2 &= \quad \quad d_2 \xi_2^0 + \dots + d_n \xi_n^0 \\
 &\dots\dots\dots \\
 A_n &= \quad \quad \quad d_n \xi_n^0
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

onde:

d_i , $i=1,2, \dots, n$ - soma algébrica dos "passos" com sucesso na direção ξ_i , $i=1,2, \dots, n$.

ξ_i^0 , $i=1,2, \dots, n$ - direções iniciais de busca

A_1 - vetor somatório dos sucessos em todas as direções de busca.

A_2 - vetor somatório dos sucessos em todas as direções de busca exceto a primeira.

.....

A_n - vetor somatório dos sucessos na n-ésima direção de busca.

Tomando por base o sistema (III.12), para manter a ortogonalidade das novas direções de busca do ponto ótimo de $u(x)$, ξ_i^1 , $i=1,2, \dots, n$, a seguinte metodologia é observada:

$$B_1 = A_1$$

$$\xi_1^1 = B_1 / |B_1|$$

$$B_2 = A_2 - A_1 \cdot \xi_1^1 \xi_1^1$$

$$\xi_2^1 = B_2 / |B_2|$$

(III.13)

.....

$$B_n = A_n - \sum_{j=1}^{n-1} A_j \cdot \xi_j^1 \xi_j^1$$

$$\xi_n^1 = B_n / |B_n|$$

Com tal procedimento, após um número "k" elevado de aplicações dos sistemas (III.12) e (III.13), pode-se afirmar que ξ_1^k é a direção de um melhor e mais rápido avanço em busca do ótimo da função $u(x)$, ξ_2^k a melhor direção que pode ser encontrada, perpendicular a ξ_1^k , e assim sucessivamente.

Embora seja função de cada problema em particular a ser resolvido, ROSENBROCK sugere tomar e_o^i , $i=1, 2, \dots, n$ com o valor de 0,1, paralelamente aos eixos definidos pelos n parâmetros x_i , bem como $\alpha=3,0$ e $\beta=-0,5$, em função das várias aplicações realizadas e resultados por ele obtidos.

Finalmente, restava estabelecer um procedimento para o problema das restrições ou limites impostos aos parâmetros, isto é, como considerar o valor da função $u(x)$ caso um dos parâmetros x_i , $i=1,2,\dots,n$ encontrado não satisfizesse a correspondente desigualdade do tipo (III.10). Nestes casos deveria ser imposta uma penalização a função $u(x)$.

Após várias formulações, ROSENBROCK assumiu a necessidade de definir, a priori da otimização da função $u(x)$, uma zona de "alerta" ou "fronteira" para cada um dos parâmetros, cuja finalidade seria indicar a eminência de ser infringida uma das restrições do tipo (III.10). Dentro desse raciocínio, e tomando por base uma qualquer desigualdade tipo (III.10), pode-se escrever:

$$g_i < g_{m+i} \leq X_i \leq h_{m+i} < h_i \quad (\text{III.14})$$

Imaginando a possibilidade de ocorrência de uma das e quações abaixo:

$$g_i < X_i < g_{m+i} \quad (\text{III.15})$$

$$h_{m+i} < X_i < h_i \quad (\text{III.16})$$

ROSENBROCK desenvolveu uma sequência de procedimentos para forçar a "saída" do parâmetro da região de fronteira (III.15) ou (III.16), em direção à sua região "viável" de variação, definida por:

$$g_{m+i} \leq X_i \leq h_{m+i} \quad (\text{III.17})$$

A manutenção da condição (III.17) para todos os parâmetros da função $u(x)$, durante todo o processo de otimização da mesma, indicaria que os sucessivos valores encontrados para $u(x)$ não seriam passíveis de penalizações. Porém, havia a necessidade de caracterizar bem qual a extensão desta região de fronteira, para cada um dos parâmetros X_i .

ROSENBROCK considerou satisfatório para a precisão dos resultados dentro do seu processo de otimização, a adoção de uma região de fronteira para cada um dos parâmetros da função, que respeitasse a igualdade (III.18) abaixo :

$$g_{m+i} - g_i = h_i - h_{m+i} = 10^{-4} (h_i - g_i) \quad (\text{III.18})$$

Os procedimentos desenvolvidos por ROSENBROCK podem ser resumidos por:

a) considera-se a "tentativa" como falha se:

$$X_i < g_i \quad \text{ou} \quad h_i < X_i$$

b) deixa-se o valor "u" encontrado para a função $u(x)$ inalterado, se:

$$\bar{g}_{m+i} \leq X_i \leq h_{m+i}$$

e armazena-se o valor anterior "uo" da função $u(x)$ com a criação de novas posições para as funções "g" e "h" por:

$$g_{2m+i} = h_{2m+i} = uo$$

c) se $g_i < x_i < g_{m+i}$, substitui-se "u" por:

$$u' = g_{2m+i} + (u - g_{2m+i}) (1 - 3\gamma + 4\gamma^2 - 2\gamma^3) \quad (\text{III.19})$$

onde:

$$\gamma = \frac{g_{m+i} - X_i}{g_{m+i} - g_i} \quad (\text{III.20})$$

d) se $h_{m+i} < X_i < h_i$, substitui-se "u" por:

$$u' = h_{2m+i} + (u - h_{2m+i}) (1 - 3\eta + 4\eta^2 - 2\eta^3) \quad (\text{III.21})$$

onde:

$$\eta = \frac{X_i - h_{m+i}}{h_i - h_{m+i}} \quad (\text{III.22})$$

Desta forma, uma vez determinado o valor u' da função $u(x)$, comparando-se com o valor armazenado u_o , na posição g_{2m+i} (ou h_{2m+i}), isto é, o menor (ou maior) valor anteriormente encontrado, pode-se verificar se existe a possibilidade de progresso na direção ξ_i , mesmo com o parâmetro x_i no interior da sua região de fronteira. Caso não exista tal possibilidade, a "tentativa" é considerada um insucesso, retornando então as condições anteriores, ou seja, assume-se o valor u_o para a função $u(x)$, e procede-se a troca da direção ξ_i de busca, para o próximo passo da otimização.

Como resultado das diversas aplicações práticas realizadas, ROSENBROCK⁵⁴ sugere um total de 1000 "tentativas" com o seu algoritmo de otimização, número este que garantiria uma confiabilidade nos resultados:

" It is difficult to be quite certain that the result found could not be improved, but from the engineering point of view it was satisfactory. A total of 1000 trials was used".

O processo de otimização utilizado foi aperfeiçoado no sentido de se conseguir substancial aceleração na busca do "ótimo", o que significa uma menor necessidade de "tentativas", assim, o fornecimento de parâmetros iniciais muito diferentes dos "verdadeiros" (que a priori não são conhecidos), não afeta a solução final. Com as constantes trocas nas direções de busca, o algoritmo produz nas primeiras "tentativas" uma rápida convergência, sendo então utilizado o restante das "tentativas" para o refinamento da solução.

III.2.3- Função Objetivo e Tamanho do Registro Adotado nas Simulações

Como visto, a adoção de um modelo conceitual para a simulação dos processos que ocorrem numa bacia hidrográfica, envolve a comparação entre as séries observadas e geradas. Com a finalidade de diminuir a subjetividade na calibração do modelo, essa comparação pode seguir o valor de uma função objetivo.

Tal técnica reduz a subjetividade de calibração, normalmente maior quando da adoção do método "tentativa e erro", contudo, pelos motivos já explicitados, pode ser uma fonte de incertezas e distorções na avaliação dos valores dos parâmetros.

Tendo-se que a expressão da função objetivo $u(x)$ deve refletir o propósito da simulação, e tomando por base os resultados obtidos, principalmente, por CANEDO^{10;11}, selecionou-se a função $u(x)$ do modelo como a seguir:

$$u(x) = \sum_t (QOBS_t - QSIM_t)^2 \quad (III.23)$$

onde:

$QOBS_t$ - descarga observada no instante t

$QSIM_t$ - descarga gerada referente ao instante t

t - instante de tempo da simulação (adotou-se como unidade de tempo o dia)

A escolha deveu-se ao fato de que tal expressão visa enfatizar o ajuste das vazões altas, encontrando-se, então, dentro dos objetivos deste trabalho.

Quanto ao tamanho do registro adotado para o ajuste dos parâmetros do modelo, fez-se a opção por um registro contendo 5 anos de dados diários, por ser tal comprimento considerado muito propício(CANEDO¹⁰), e portanto, não acarretando um maior gasto computacional.

Devem ainda ser ressaltadas duas simplificações efetuadas na avaliação do ajuste obtido com a função $u(x)$, constante na expressão (III.23). A primeira foi a não consideração dos valores referentes aos três primeiros dias de cada registro. O modelo conceitual (rotina CALCFX) poderia vir a produzir resultados iniciais bastante divergentes dos observados, desde que os níveis iniciais fornecidos para os "reservatórios" da bacia, não fossem muito corretos. Contudo, rapidamente seria absorvida tal "incoerência" inicial, com o ajuste dos níveis de armazenamento nos "reservatórios" pelo modelo.

A segunda simplificação resultou de alguns testes iniciais efetuados com o modelo, e com arquivos provenientes da população gerada pelo SWM-IV. Verificou-se que sendo a finalidade principal do ajuste dos parâmetros a tentativa de reprodução das sequências máximas observadas, poderiam ser eliminadas no cálculo do valor da função $u(x)$ as parcelas referentes aos desvios entre as vazões baixas observadas e geradas.

Foi suposto que para descargas observadas inferiores a um valor pré-estabelecido (1,5mm/dia), não seriam calculadas as parcelas devidas a tais descargas no valor de $u(x)$. Isto, a

parentemente, enfatizará ainda mais o ajuste das vazões altas. O valor de 1,5mm/dia foi escolhido por representar, aproximadamente, 50% de permanência dentre os 900 anos da população de descargas diárias geradas.

Com tal simplificação, não mais seriam fixos em 5 anos os registros de dados a serem utilizados nos ajustes. Porém, deve ser notado, que não se trata de considerar registros com comprimentos inferiores a 5 anos para o ajuste dos parâmetros do modelo, mas sim, registros com 5 anos, dos quais seleciona-se as descargas "altas" para a calibração dos parâmetros.

Resta dizer que o ajuste dos registros observados aos gerados foi efetuado por minimização da função $u(x)$ adotada, utilizando-se para tanto um máximo de 1200 "tentativas" ou cálculos da função objetivo. Este total situa-se dentro da faixa considerada boa por ROSENBROCK⁵⁴, IBBITT e O'DONNELL^{28,29} e CANEDO¹⁰.

III.3- METODOLOGIA DE PREVISÃO DA MAGNITUDE DAS CHEIAS

Como já enunciado, existem numerosas distribuições de probabilidade desenvolvidas para modelar os eventos máximos anuais das descargas diárias. Tanto os trabalhos do W.R.C.^{59,60}, como REICH⁵¹ e outros autores, apresentam várias aplicações de tais distribuições, conclusões e recomendações sobre a adoção de uma ou outra, em função do caso específico analisado.

Neste trabalho considerou-se apenas a utilização da distribuição de GUMBEL ou distribuição de eventos extremos tipo I. A adoção desta distribuição é tão válida como a de qualquer uma outra que porventura viesse a ser selecionada. O objetivo da sua aplicação foi o de fornecer resultados de previsão das cheias, quando aplicada aos vários arquivos de descargas "observadas" e geradas, para serem comparados entre si.

A distribuição de GUMBEL tem como função de distribuição acumulada:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (\text{III.24})$$

onde:

e - representa a função exponencial

α - parâmetro de dispersão

β - parâmetro de locação

x - pertence ao intervalo $-\infty < x < +\infty$

Imaginando uma variável reduzida y , tal que:

$$y = \alpha(x - \beta) \quad (\text{III.25})$$

Pode-se escrever a expressão (III.24) da seguinte forma:

$$F(y) = e^{-e^{-y}} \quad (\text{III.26})$$

Consequentemente, sua função de densidade de probabilidade será:

$$f(y) = F'(y) = e^{-y} e^{-e^{-y}} \quad (\text{III.27})$$

Se a variável reduzida y é a cheia máxima de algum ano, e P_r representar a probabilidade de tal valor não ser excedido, então o período de retorno, T , necessário para que isto venha a ocorrer, ou seja, y seja ultrapassado, pode ser determinado por:

$$P_r(Y > y) = 1 - F(y) = 1/T \quad (\text{III.28})$$

$$1 - e^{-e^{-y}} = 1/T \quad (\text{III.29})$$

$$y = -\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - 1/T)) \quad (\text{III.30})$$

Associando (III.25) e (III.30) pode-se relacionar uma cheia com uma determinada magnitude, X , ao correspondente período de retorno, T , por:

$$X = \beta + \frac{1}{\alpha} \cdot (-\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - 1/T))) \quad (\text{III.31})$$

A estimação dos parâmetros da distribuição através do método dos momentos irá fornecer (KITE³³):

$$\begin{aligned}\mu_1' &= \beta + \frac{\gamma}{\alpha} \\ \mu_2 &= \frac{\gamma^2}{6\alpha^2}\end{aligned}\tag{III.32}$$

Escrevendo o sistema (III.32) em função de α e β , porém considerando μ e σ , média e desvio-padrão da amostra, e tendo-se que $\gamma = 0,5772157$ (constante de EULER):

$$\alpha = \frac{1,2825}{\sigma}\tag{III.33}$$

$$\beta = \mu - 0,4500\sigma$$

A partir do sistema de equações (III.33), e da expressão (III.31), enunciada para associar uma cheia com uma determinada magnitude, X , ao correspondente período de retorno, T , teríamos (KITE³³):

$$X(T) = \mu - \sigma \{0,4500 + 0,7797 \ln(-\ln(1-1/T))\}\tag{III.34}$$

onde:

$X(T)$ - vazão prevista correspondente ao período de retorno T anos

T - período de retorno

μ - média da amostra considerada

σ - desvio-padrão da amostra considerada.

Os coeficientes de assimetria e curtose para a distribuição de eventos extremos tipo I são respectivamente 1,14 e 5,40.

Para a análise e comparação gráfica dos resultados foi construído um papel gráfico, denominado papel probabilístico de GUMBEL, que correlaciona as cheias, X , com os períodos de retorno, T , de forma linear, a partir das expressões matemáticas que regem a distribuição.

III.3.1- Estudos Iniciais com a População de Dados

A partir da geração dos registros diários de precipitação e vazão existia a necessidade de serem determinadas as características da população de descargas geradas, uma vez que tais resultados serviriam de base a qualquer futura comparação. Inicialmente foi calculada a média e desvio-padrão referentes aos 900 anos de vazão diárias, que resultaram nos seguintes valores:

$$\text{MÉDIA: } \mu = 8,2983 \text{ mm/dia} \quad (\text{III.35})$$

$$\text{DESVIO-PADRÃO: } \sigma = 2,2571 \text{ mm/dia}$$

Com a expressão (III.34) e os valores de (III.35), calculou-se a previsão das cheias correspondentes aos seguintes períodos de retorno: 50, 100 e 1000 anos (quadro (Q.III.4)). Após o que foi traçado no papel probabilístico de GUMBEL, figura (F.III.3) a seguir, a reta representativa da tendência geral da população, isto é, a representação gráfica dos valores "verdadeiros" das magnitudes das cheias para os diversos períodos de retorno.

QUADRO Q.III.4 - PREVISÃO DOS VALORES DAS CHEIAS EM FUNÇÃO DO PERÍODO DE RETORNO

T (ANOS)	PREVISÃO (mm/dia)
50	14,1495
100	15,3782
1000	19,4384

Uma vez definidas as características da população (900 anos) de vazões diárias, a próxima etapa seria a seleção dos registros a serem estendidos. Neste aspecto, dado o objetivo principal deste trabalho de verificar a melhora obtida com a extensão de um curto período de dados, para a previsão das cheias referentes a grandes períodos de retorno, optou-se por dividir a população gerada em 30 registros, cada um com um comprimento de 30 anos. A metodologia proposta para o desenvolvimento do traba

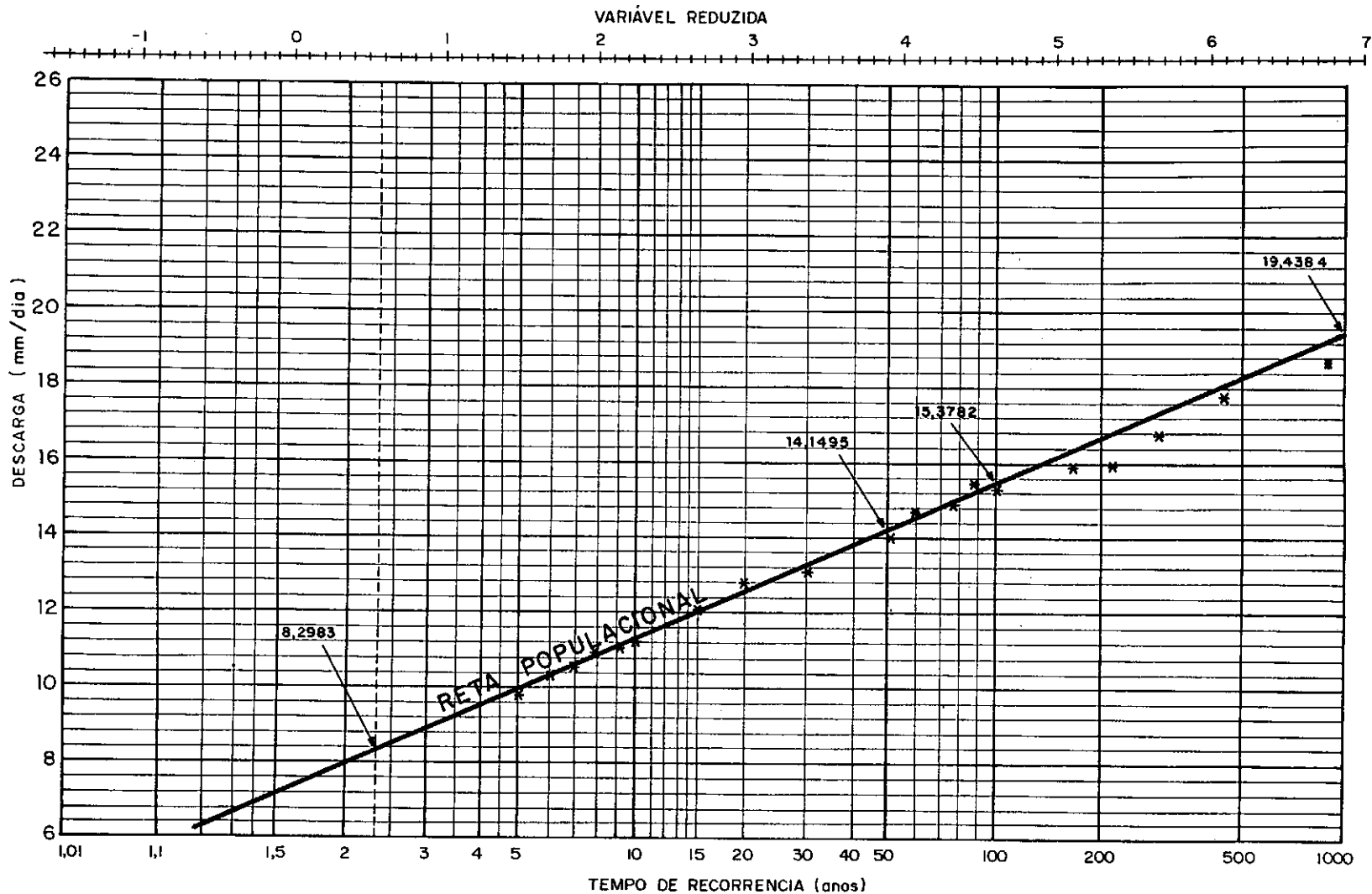
lho, pode ser resumida como a seguir.

Com os registros serão determinadas as previsões das cheias para $T = 50, 100$ e 1000 anos. Logicamente, uma gama de 30 valores em torno do valor "correto", isto é, definido pela população, surgirão para os diversos períodos de retorno. A diferença entre os dois valores encontrados que sejam, tanto superior com inferiormente, mais afastados do valor "verdadeiro" de finirá a amplitude de variação para cada um dos períodos de retorno, nas previsões com os arquivos contendo 30 anos das das cargas diárias "observadas".

A posteriori, repetir-se-ão os passos, acima definidos somente para os 10 primeiros anos de cada um dos 30 arquivos. Neste caso, em função do comprimento dos registros utilizados serem inferiores aos anteriormente adotados, as amplitudes em torno dos valores "verdadeiros", para os períodos de retorno considerados, deverão ser maiores. Haverá uma tendência a um maior afastamento da reta que define a população gerada.

Finalmente, considerando os 5 primeiros anos de cada um dos 30 arquivos, será feito o ajuste dos parâmetros do modelo de otimização e geração. Após a calibração dos parâmetros, tomando-se os 10 anos iniciais dos dados hidrológicos "observados", e os subsequentes 20 anos de precipitações e evapotranspiração, com o modelo chuva-vazão serão compostos 30 novos arquivos, com um comprimento de registro igual a 30 anos. A partir da distribuição GUMBEL, serão obtidas novas previsões dos valores das cheias para cada período de retorno considerado.

A análise de todos os resultados obtidos irá, possivelmente, indicar se é um processo válido para a previsão das magnitudes das cheias, a extensão dos registros fluviométricos através de modelos matemáticos do tipo "chuva-vazão".



OBS:

* VALORES DA POPULAÇÃO DE DESCARGAS GERADAS

FIG. F.III.3 - RETA REPRESENTATIVA DA POPULAÇÃO DE DESCARGAS GERADAS.

CAPÍTULO IV

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS

Neste capítulo será apresentado um resumo de todos os resultados relevantes alcançados, direta ou indiretamente, durante o desenvolvimento desta pesquisa.

A apresentação dos valores resultantes do trabalho, para facilitar a exposição, foi dividida em duas principais seções dentro da sequência natural de obtenção dos mesmos, como explicitadas abaixo:

- IV.1- Fase de Geração e Calibração dos Dados Utilizados no Trabalho
- IV.2- Fase de Previsão e Análise dos Valores das Cheias para os Casos Estudados

A primeira seção refere-se a etapa de preparação da população de dados, e subsequente calibração dos parâmetros do modelo de extensão dos registros fluviométricos para os vários arquivos gerados. A outra seção traz os resultados, para os períodos de retorno considerados, dos valores das cheias referentes aos diversos arquivos de descargas diárias obtidos com a utilização da distribuição GUMBEL de eventos extremos, e a análise dos mesmos.

IV.1- FASE DE GERAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NO TRABALHO

Sendo selecionado o total de 900 anos para representar a população necessária para o desenvolvimento deste trabalho, a primeira etapa deste capítulo apresenta os resultados referentes a geração de tal montante de valores. Como já explicitado, utilizando-se os modelos matemáticos desenvolvidos por KELMAN³² e LINSLEY e CRAWFORD¹⁴, foram obtidas as precipitações

e respectivas descargas diárias para o total de anos requeridos.

O quadro (Q.IV.1) traz a identificação de cada um dos 30 arquivos, de igual comprimento de registro (30 anos), nos quais foram armazenados o total de dados gerados. Tal notação servirá de base para identificar todos os futuros resultados a serem apresentados.

IV.1.1- Resultados Obtidos na Geração dos Dados

Uma descrição detalhada de todo o volume de dados gerados parece desnecessária, uma vez que os mesmos poderão, facilmente, ser reproduzidos através dos modelos matemáticos e conjuntos de parâmetros adotados durante o desenvolvimento do trabalho.

Contudo, a apresentação de algumas características da população de precipitações e descargas diárias é relevante para mostrar a ordem de grandeza dos valores tratados nesta pesquisa.

Os registros de precipitações diárias foram elaborados a partir do algoritmo descrito anteriormente, e dos parâmetros constantes no quadro (Q.III.1). Os resultados obtidos foram bastante significativos, principalmente na geração das sequências de dias chuvosos responsáveis pelas descargas extremas posteriormente verificadas na "bacia hidrográfica" do estudo.

Os totais anuais da população com 900 anos gerada, variaram entre um máximo de 2514,7 mm e um mínimo de 1205,7 mm. Estes valores, de acordo com o quadro (Q.IV.1), seriam rotulados como pertencentes ao ano 24 do arquivo 28 e ao ano 9 do arquivo 5, respectivamente.

A média de todos os totais anuais de precipitação obtidos correspondeu a 1777,5 mm. Este resultado é bastante satisfatório, pois encontra-se dentro da amplitude de variação (1600-2000 mm) dos totais anuais do posto pluviométrico de Caixa D'água,

QUADRO Q.IV.I - IDENTIFICAÇÃO DA NUMERAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CHUVAS E DE VAZÕES MÉDIAS DIÁRIAS OBTIDOS DA "POPULAÇÃO" (900 ANOS) GERADA

Nº DO ARQUIVO	CONTEÚDO DO ARQUIVO	
	ANO INICIAL	ANO FINAL
01	1	30
02	31	60
03	61	90
04	91	120
05	121	150
06	151	180
07	181	210
08	211	240
09	241	270
10	271	300
11	301	330
12	331	360
13	361	390
14	391	420
15	421	450
16	451	480
17	481	510
18	511	540
19	541	570
20	571	600
21	601	630
22	631	660
23	661	690
24	691	720
25	721	750
26	751	780
27	781	810
28	811	840
29	841	870
30	871	900

município de Aparecida do Norte, selecionado para a determinação dos parâmetros do modelo de precipitação.

A criação da população dos registros de evapotranspiração foi realizada de maneira extremamente simples. Selecionouse um ano dos registros históricos disponíveis do posto pluviométrico de Caixa D'água, com totais mensais medidos e um total anual correspondente a 1200 mm.

Adotou-se como hipótese a invariabilidade dos valores observados, fazendo-se repetir, cíclicamente, os mesmos para os 900 anos requeridos. Os totais diários necessários para as simulações com os modelos "chuva-vazão" adotados foram obtidos pela simples divisão do total mensal observado pelo número de dias do respectivo mês.

Esta premissa simplificada certamente não influenciou os resultados do trabalho, uma vez que, na prática, os totais anuais de evapotranspiração potencial observados, em geral, apresentam diferenças pouco significativas, e as variações mensais ou diárias não são, significativamente, elementos de perturbações nos valores das vazões máximas observadas.

Com os registros de precipitações e evapotranspiração, selecionou-se um conjunto inicial de parâmetros que passaram a representar a "bacia hidrográfica" estudada, e através do SWM-IV foram obtidas as descargas diárias requeridas.

A partir da população de descargas gerada selecionou-se o conjunto das máximas descargas anuais diárias, através da metodologia denominada por "série anual". Como a apresentação de todos os valores diários gerados representaria um volume exagerado de dados, foram formulados os quadros ... (Q.IV.2.1) até (Q.IV.2.3) contendo o conjunto das vazões máximas.

A escolha do método da "série anual" para a seleção dos eventos extremos deveu-se a necessidade, nesta pesquisa, de associar as cheias observadas com os respectivos intervalos de recorrência. O mesmo não seria possível com a utilização da me

QUADRO Q.IV.2.1 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) GERADAS PELO MODELO SWM-IV

ANO	ARQUIVOS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5.8592	6.4167	7.3846	13.4992	7.4977	3.4706	7.1014	8.7934	6.6485	8.2948
2	5.8934	7.3226	6.9271	9.9151	8.1554	7.9638	7.2056	9.8557	9.1225	4.9950
3	4.2121	6.6174	4.4836	9.0689	7.7770	6.6920	12.6464	6.9570	7.0927	10.3269
4	5.2378	6.6657	7.4725	9.0989	3.9849	11.8419	8.3692	10.4766	9.8304	8.4698
5	6.5104	6.0398	7.5081	6.3316	7.5647	5.0425	9.5700	7.4060	11.7714	6.3455
6	7.6937	6.9316	6.9586	12.5098	7.8537	9.2297	8.0601	6.8518	12.4931	7.6940
7	10.5562	6.7596	8.8449	8.9175	7.0670	8.0208	5.6502	7.9559	6.5371	8.3395
8	6.4552	9.1305	9.0199	6.6162	3.6783	8.3320	6.0255	8.1035	5.8121	11.1010
9	9.1530	11.7094	7.1866	16.7309	4.8829	12.7541	7.3065	7.1741	9.4968	10.7880
10	6.2034	5.2561	11.9835	8.1728	11.0096	8.6196	6.3337	7.0021	8.5521	6.6787
11	11.4545	10.9663	7.3630	7.4907	9.2269	5.8832	11.0084	10.2148	6.4231	4.5415
12	9.4623	8.2225	10.6267	10.7065	9.7595	5.6575	8.4032	6.6470	4.2027	8.9425
13	6.3310	10.6668	6.3931	4.5458	7.8023	6.6955	8.3648	4.6139	7.3092	9.5436
14	5.8104	13.6499	6.0660	8.9127	5.3881	8.2481	8.1936	7.0622	9.5244	7.3305
15	7.7151	5.7947	9.4515	6.9867	6.8861	9.3773	5.6986	6.3906	9.0228	11.6242
16	10.5402	10.4424	7.9537	5.9902	7.2713	7.5009	12.5584	4.7229	9.2474	5.7854
17	8.5743	6.5979	8.3493	6.7250	8.9019	12.9558	11.4919	7.3172	7.8294	10.9509
18	10.2269	6.6930	8.5449	7.3676	13.2711	6.6375	8.9814	7.3042	7.3889	10.7682
19	12.5126	12.0952	12.8036	5.4163	5.7363	9.1392	10.2945	7.4025	7.5729	8.1909
20	7.4207	7.0487	12.0439	7.4289	8.0932	6.8345	6.8425	5.9137	8.0700	9.6085
21	8.1701	7.8935	10.1120	6.4956	9.3877	11.5325	15.4354	12.8273	7.1309	6.6717
22	8.1495	12.7047	5.3047	7.2498	8.7927	7.5172	6.3279	7.2229	9.6001	9.9802
23	6.9963	10.8268	8.0819	9.5419	6.9859	8.2155	6.4102	6.8978	6.3466	5.1579
24	9.3956	6.9663	5.4581	6.2748	7.2198	6.9185	9.8936	9.0799	7.3474	9.2454
25	10.5116	8.2934	9.0023	5.9855	7.5623	8.0296	7.4708	6.0616	5.7933	5.0834
26	8.3368	8.6701	6.5646	5.1435	7.6124	8.3057	11.7446	8.8607	8.4835	7.6462
27	7.0578	5.9611	9.5833	5.1896	5.0893	5.8827	7.7267	12.9690	9.5753	5.2142
28	10.9153	11.4384	8.2539	7.9913	11.0242	9.5594	9.7442	7.2500	12.7532	11.9313
29	11.6214	6.6380	13.0800	7.8762	10.3147	8.3325	7.8070	7.7221	7.9164	9.6087
30	7.9296	8.5265	9.0605	6.0150	10.0455	10.2309	8.6347	3.9762	5.2124	9.0934

QUADRO Q.IV.2.2 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) GERADAS PELO MODELO SWM-IV

ANO	ARQUIVOS									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	9.9956	5.7803	7.5480	7.9228	6.6033	12.8239	6.6481	7.6788	9.8131	7.1219
2	6.3668	6.8974	6.8800	7.6319	8.6517	8.5401	12.4820	7.0380	6.2978	9.9260
3	8.7950	11.6072	6.9891	6.5488	4.5401	6.4789	6.5514	8.6014	12.4336	8.5023
4	8.5153	7.5388	7.4773	5.3462	8.9212	8.4989	6.5351	11.4146	8.0347	15.9121
5	6.5776	5.4719	7.8618	8.7137	6.5141	7.3309	10.1237	11.3374	9.9846	7.9295
6	11.2323	8.1738	6.7278	6.8613	9.7974	7.9939	7.0509	8.1168	7.4998	8.3788
7	3.7958	8.1319	7.8803	13.9348	8.2030	8.0391	4.8369	7.5926	13.2345	8.7005
8	7.9892	8.6485	6.2191	8.1406	4.8635	6.1967	6.0574	7.7048	15.3071	11.3881
9	6.7137	10.3640	9.3233	7.4072	12.3284	13.2189	8.4675	5.3527	7.6404	7.5287
10	7.2842	6.3184	7.7325	7.2242	9.1174	7.4363	7.6750	8.9008	8.1113	6.3030
11	5.8640	8.0082	11.2259	11.7038	5.5920	10.9232	8.3511	7.2277	10.8917	5.0015
12	10.5961	6.0022	7.0851	6.1078	9.5758	8.7511	7.5129	7.0102	6.9025	7.1834
13	8.2915	7.8234	10.4693	3.4902	7.8536	10.2997	8.8150	8.7734	10.6018	4.7406
14	7.2320	9.0419	8.2321	11.4670	11.3628	8.9327	7.5132	6.3033	8.1180	9.2316
15	8.7282	9.6190	5.0205	7.3338	7.3888	5.2408	7.7980	11.7675	7.4091	5.3115
16	9.0037	5.7963	13.3989	5.0620	10.5860	13.4678	10.8079	6.2354	12.1239	7.1110
17	10.8521	10.5273	13.0508	9.6815	7.7281	13.3859	12.1712	6.4732	6.4899	10.4678
18	9.2635	5.1509	7.0283	6.4200	6.4253	8.4710	6.3576	7.0528	5.4793	6.5258
19	6.9821	7.7939	7.9654	9.3680	7.6670	8.1093	5.7847	10.7040	7.6988	5.9976
20	9.9884	6.1896	10.7533	10.7637	7.2046	9.5460	12.7003	8.3394	12.2091	6.1947
21	11.7643	9.7689	9.0120	5.0274	10.7256	7.6666	6.0425	7.3868	9.6392	9.2316
22	7.6567	5.0382	9.8816	10.0495	6.9687	10.3470	9.3537	4.4709	9.2874	10.5290
23	6.6787	12.0004	7.9057	10.4583	6.9416	6.9803	8.0308	3.6354	8.1869	8.5102
24	8.1860	12.9410	7.7174	11.9261	9.6100	7.4721	6.0992	9.3676	12.5389	5.3805
25	8.5903	8.4289	5.7955	7.9974	8.8432	7.4405	8.3397	14.6412	5.4677	5.3509
26	7.2442	6.8602	8.1334	7.1730	10.9593	5.7274	5.1219	7.4948	7.8968	7.3210
27	9.2034	6.4901	11.2027	6.4366	8.7646	14.3464	6.6261	12.1290	8.4373	8.7820
28	11.3697	13.8755	6.7409	10.9691	7.7621	8.3541	10.6265	10.9756	4.7734	7.0709
29	10.5172	8.0613	10.7734	9.7667	6.8428	6.5414	5.1736	9.1773	7.7124	7.8832
30	6.1619	4.8061	6.4716	7.0401	9.4537	8.7845	9.4081	3.7917	12.4680	9.2835

QUADRO Q.IV.2.3 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) GERADAS PELO MODELO SWM-IV

ANO	ARQUIVOS									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	10.9206	6.6708	5.3595	10.6177	5.9957	6.9748	13.2981	8.5106	7.5643	9.9113
2	14.5311	6.5074	8.2797	8.1661	7.8913	9.7238	7.0826	8.1142	6.8074	6.0237
3	9.2036	8.8894	9.6154	6.4096	8.3984	8.1829	6.9405	11.9304	5.5478	8.1295
4	6.2174	7.0500	8.9484	9.1680	8.5943	7.5354	7.2868	8.3963	7.7612	14.3152
5	6.7629	12.4357	6.4817	5.7260	7.4810	11.6195	4.4699	7.3214	7.5443	7.1431
6	8.1620	5.0681	10.2551	8.4854	7.3737	6.5506	10.3316	7.2697	14.2073	6.2782
7	7.4190	8.4803	4.9480	7.8022	9.2047	8.7725	5.8129	9.8405	9.8581	6.1714
8	4.2030	8.6745	7.0585	9.3942	7.9213	9.1533	6.3649	9.7348	6.5439	10.3063
9	8.4087	8.2331	8.7388	8.2823	8.1488	7.3905	5.9448	15.7085	6.9052	7.2024
10	9.5712	8.5523	8.5185	6.6218	8.5761	9.6590	8.8371	8.6992	6.5818	8.1482
11	4.4862	7.7762	7.6990	6.7866	6.8195	8.8268	5.1704	6.4636	5.6663	7.5093
12	6.2264	4.4567	7.8058	10.5735	7.4043	8.8548	7.3798	8.3107	6.2681	8.3060
13	8.0471	12.0284	6.0291	7.8866	7.8751	9.8693	10.1154	7.1750	7.5995	7.0350
14	7.0353	9.0193	13.7193	6.6625	6.8805	8.4683	6.0702	6.8202	10.1832	7.5574
15	4.8462	7.0774	7.1842	6.6399	9.5258	7.1374	8.7608	7.0867	8.3149	7.5621
16	8.8358	7.0978	17.7983	7.9644	15.8729	14.2642	9.3738	8.7996	6.0320	9.0016
17	6.4219	7.9672	6.0711	9.5058	6.4016	14.8441	7.5205	12.1656	10.0190	8.2575
18	8.3854	9.4969	10.2743	6.6832	5.9648	9.3746	7.5600	6.6420	6.7027	8.8078
19	8.2504	7.3058	11.5204	10.0955	9.1807	9.3397	8.4231	5.9443	18.6003	6.2559
20	9.2557	9.5829	9.6509	6.2827	7.8143	6.5057	7.7445	7.5380	5.4103	4.3767
21	10.8748	8.9093	9.1633	10.0684	9.6976	7.9818	5.2729	8.2250	11.3044	4.7496
22	8.4488	8.9580	9.7286	7.8344	9.0445	10.5414	9.9654	5.5204	7.6357	10.4585
23	13.1693	11.5384	10.5174	10.9333	8.2735	4.4063	6.5455	9.5140	6.6573	6.0231
24	9.1485	8.0214	6.8107	6.2272	4.9513	7.6749	8.1111	10.0219	8.2806	9.3374
25	10.2262	7.0359	4.1301	10.4687	7.5280	10.9902	5.2777	6.2380	6.3997	7.9940
26	7.2088	8.0176	8.0782	6.0457	6.9438	10.4834	6.9251	7.1874	11.4276	8.3295
27	5.2821	15.7550	6.0760	9.4351	6.3864	10.4857	10.4113	7.4186	5.0453	8.2964
28	10.1339	9.9570	7.4738	7.3800	9.8025	6.4629	6.7517	9.4251	8.1653	9.9337
29	11.1231	8.7473	9.5771	7.7906	7.7798	10.0167	8.8377	8.6729	8.0698	5.7071
30	9.0585	9.8544	7.9266	14.9349	6.9673	6.0596	10.6249	15.3338	8.2639	7.5264

todologia da "série de duração parcial" dos eventos extremos.

A primeira etapa do trabalho pode ser considerada concluída com a formação dos registros de precipitações, descargas e dados de evapotranspiração diários. Tendo por base tais valores passou-se a fase de calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão com o propósito de possibilitar a extensão dos registros fluviométricos.

IV.1.2- Resultados da Fase de Calibração dos Dados

Inicialmente, com o intuito de uniformizar o procedimento de cálculo, foi assumido que seriam selecionados os cinco primeiros anos de cada um dos arquivos de descargas diárias para o ajuste dos parâmetros do modelo.

A busca do conjunto "ótimo" dos parâmetros, que envolve a comparação entre descargas "observadas" e geradas, foi realizada pela minimização da função $u(x)$, expressa por:

$$u(x) = \sum_t (QOBS_t - QSIM_t)^2 \quad (IV.I)$$

onde:

$QOBS_t$ - descarga "observada" no instante t

$QSIM_t$ - descarga gerada referente ao instante t

t - instante de tempo da simulação (adotou-se como unidade de tempo o dia)

Contudo, como já mencionado no capítulo anterior, adotou-se duas simplificações na avaliação de $u(x)$. Não foram considerados os três dias iniciais de cada registro de 5 anos, para permitir o equilíbrio dos níveis iniciais dos "reservatórios" do modelo. Também, só foram utilizadas as parcelas do quadrado da diferença entre as vazões "observada" e gerada, quando o valor da primeira fosse igual ou superior a 1,5 mm/dia.

A partir destas simplificações, o valor de $u(x)$, como descrita por (IV.1), para os distintos grupos de 5 anos de da dos, dependeria do número de descargas observadas consideradas válidas. O total de descargas "observadas" iguais ou superiores ao limite imposto vieram a definir o conjunto de valores real mente ativos, na fase de otimização dos parâmetros, para cada um dos 30 arquivos.

Para possibilitar a comparação do progresso obtido na otimização dos diferentes arquivos, havia a necessidade de trans formar o valor de $u(x)$, que possui dimensão $(\text{mm}/\text{dia})^2$, em um número adimensional. Com isto também seria removido o efeito do comprimento do registro no cálculo da função objetivo.

Para a obtenção deste adimensional, adotou-se a trans formação escrita como:

$$u(x)\text{NORM.} = \frac{(m \sum_t (Q^*\text{OBS}_t - Q\text{SIM}_t)^2)^{1/2}}{\sum_t Q^*\text{OBS}_t} \quad (\text{IV.2})$$

onde:

- $u(x)$ NORM. - valor da função objetivo normalizada
- m - número de valores ativos no cálculo de $u(x)$
- $Q^*\text{OBS}_t$ - descarga "observada" ($> 1,5 \text{ mm}/\text{dia}$) no ins tante t
- $Q\text{SIM}_t$ - descarga gerada referente ao instante t
- t - instante de tempo da simulação (adotou-se co mo unidade de tempo o dia)

Tendo por base a expressão (IV.2), e as demais premis sas já expostas neste trabalho, através da calibração dos parâ metros do modelo foram obtidos os resultados do quadro (Q.IV.3). O conjunto de parâmetros iniciais adotado para todos os 30 ar quivos encontra-se no quadro (Q.III.3) deste trabalho.

O processo de calibração dos parâmetros, com o objeti

QUADRO Q.IV.3 - VALORES RESULTANTES DA FASE DE CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO CHUVA-VAZÃO

Nº ARQ.	% DE VALORES ATIVOS Nº CÁLC. DE $u(x)$ NORM.	VALORES DE $u(x)$ NORM.		% DE VARIAÇÃO
		INICIAL	FINAL	
1	44,29	0,2419	0,2205	8,85
2	48,30	0,2112	0,1934	8,43
3	49,07	0,2726	0,2436	10,64
4	53,40	0,2205	0,1894	14,10
5	52,63	0,2417	0,2271	6,04
6	49,73	0,2321	0,2156	7,11
7	58,23	0,2481	0,2182	12,05
8	66,79	0,2180	0,1968	9,72
9	52,41	0,1982	0,1886	4,84
10	54,72	0,1965	0,1842	6,26
11	62,07	0,2142	0,1934	9,71
12	52,58	0,2319	0,2098	9,53
13	66,08	0,2133	0,2047	4,03
14	51,81	0,2378	0,2176	8,49
15	39,02	0,2638	0,2276	13,72
16	58,45	0,2265	0,1913	15,54
17	46,49	0,2043	0,1803	11,75
18	65,20	0,2155	0,1955	9,28
19	48,02	0,1889	0,1661	12,07
20	49,51	0,2002	0,1792	10,49
21	48,90	0,2306	0,2000	13,27
22	54,45	0,2141	0,1936	9,57
23	48,90	0,2048	0,1904	7,03
24	56,42	0,2596	0,2385	8,13
25	51,54	0,2324	0,2165	6,84
26	48,41	0,1938	0,1813	6,45
27	41,16	0,2256	0,2045	9,35
28	56,04	0,2291	0,2075	9,43
29	57,63	0,2591	0,2272	12,31
30	50,71	0,2583	0,2286	11,50
VALORES MÉDIOS	52,77	—	—	9,55

OBS.: a) 100% de valores ativos no cálculo de $u(x)$ NORM. corresponderia a 1822 pares (descargas "observadas", descargas geradas), em função das premissas adotadas no estudo

vo de minimizar a função $u(x)$ NORM., foi limitado a um mínimo de 1200 cálculos da função objetivo. Contudo poderia o mesmo vir a ser interrompido antes deste total de "tentativas", desde que fosse alcançada a "convergência" da função objetivo.

Considerou-se como "convergência" da função $u(x)$ NORM., o instante de cálculo a partir do qual qualquer progresso no seu valor fosse insignificante. Para quantificar matematicamente este instante adotou-se a expressão a seguir:

$$\{ |(u(x) \text{ NORM.})_t - (u(x) \text{ NORM.})_{t-1}| < 0,00000001 \times |(u(x) \text{ NORM.})_{t-1}| \}$$

(IV.3)

onde:

- $u(x)$ NORM. - função objetivo normalizada
- $|u(x) \text{ NORM.}|$ - módulo da função $u(x)$ NORM.
- $t; t-1$ - instantes de tempo atual e anterior, respectivamente, da simulação.

Após a fase de calibração dos parâmetros, procedeu-se a geração com o mesmo modelo dos últimos 20 anos de vazões diárias de cada arquivo, considerando os correspondentes registros de precipitações e evapotranspiração sobre a "bacia hidrográfica".

Desta forma, foram compostos 30 novos arquivos contendo cada um 10 anos iniciais de descargas "observadas" agrupadas aos 20 anos gerados pelo modelo. Os quadros (Q.IV.4.1) até (Q.IV.4.3) apresentam as vazões máximas diárias de cada ano para todos os arquivos.

A performance do modelo durante a fase de calibração dos parâmetros foi bastante satisfatória. Na figura (F.IV.1), a seguir, é mostrada a evolução do valor $u(x)$ em função do número de iterações para o arquivo 7, selecionado ao acaso na

QUADRO Q.IV.4.1 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) "OBSERVADAS" (10 ANOS) E GERADAS (ÚLTIMOS 20 ANOS)

ANO	ARQUIVOS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5.8592	6.4167	7.3846	13.4992	7.4977	3.4706	7.1014	8.7934	6.6485	8.2948
2	5.8934	7.3226	6.9271	9.9151	8.1554	7.9638	7.2056	9.8557	9.1225	4.9950
3	4.2121	6.6174	4.4836	9.0689	7.7770	6.6920	12.6464	6.9570	7.0927	10.3269
4	5.2378	6.6657	7.4725	9.0989	3.9849	11.8419	8.3692	10.4766	9.8304	8.4698
5	6.5104	6.0398	7.5081	6.3316	7.5647	5.0425	9.5700	7.4060	11.7714	6.3455
6	7.6937	6.9316	6.9586	12.5098	7.8537	9.2297	8.0601	6.8518	12.4931	7.6940
7	10.5562	6.7596	8.8449	8.9175	7.0670	8.0208	5.6502	7.9559	6.5371	8.3395
8	6.4552	9.1305	9.0199	6.6162	3.6783	8.3320	6.0255	8.1035	5.8121	11.1010
9	9.1530	11.7094	7.1866	16.7309	4.8829	12.7541	7.3065	7.1741	9.4968	10.7880
10	6.2034	5.2561	11.9835	8.1728	11.0096	8.6196	6.3337	7.0021	8.5521	6.6787
11	8.3975	10.0623	6.6184	6.0440	8.2332	5.5331	8.5520	9.8457	6.7580	5.2961
12	8.4191	7.1876	9.6909	10.4596	9.7493	7.3645	6.4496	6.4232	4.1130	7.5385
13	7.1565	10.3163	5.7825	4.5977	6.7789	6.6753	6.3235	5.7671	6.7548	9.1470
14	4.9437	13.6071	5.2929	7.6297	4.7425	7.1313	7.2919	6.4145	8.2101	7.9194
15	9.0702	6.0304	7.9044	6.7608	6.4603	10.0713	4.6601	6.1317	7.5449	11.1373
16	9.1074	9.6015	7.6675	5.8202	5.8126	6.7792	10.9483	5.1841	9.8813	5.0632
17	7.9443	6.1663	7.5833	6.3196	8.1722	10.8842	10.7083	7.9300	10.1508	10.6412
18	9.8854	6.7853	7.3701	7.1024	12.7379	7.8563	8.3416	7.8078	7.5543	10.2682
19	10.8563	11.3415	11.7889	5.7882	6.0182	10.2151	9.5039	9.2887	7.2695	8.0803
20	5.8909	6.6611	9.1297	8.4608	8.3865	7.3423	5.9028	5.7880	6.7089	9.0390
21	7.8100	7.4759	9.8532	8.3730	9.4535	12.1653	15.6270	12.7432	7.6495	6.3026
22	9.1676	11.8274	5.1176	6.5331	9.8995	6.1392	5.6369	6.1722	8.7984	11.5355
23	6.0980	8.4558	7.7250	10.2802	7.6544	8.5054	7.5908	6.6701	6.8498	5.7270
24	7.3703	7.3077	6.5872	6.1339	6.7960	7.4859	8.3608	9.2991	7.8637	8.9756
25	10.0432	7.7550	8.8975	6.6799	7.9321	9.0021	7.2926	7.0094	5.8445	5.2106
26	7.9682	8.9636	6.4059	4.9137	6.9186	8.1613	11.5917	9.3691	7.5425	8.2035
27	7.5749	6.2726	9.4975	5.6914	6.3871	6.2867	5.9266	13.3398	8.5070	5.2376
28	11.4139	11.4177	8.7820	7.3694	10.2936	10.2844	9.2040	7.9917	12.3424	12.4029
29	10.9584	6.9726	11.6540	7.6873	9.4062	8.9270	6.0166	8.4639	7.6971	7.7839
30	8.3309	8.7566	10.1284	6.4572	10.8615	10.0598	8.7340	6.6369	5.3061	9.5879

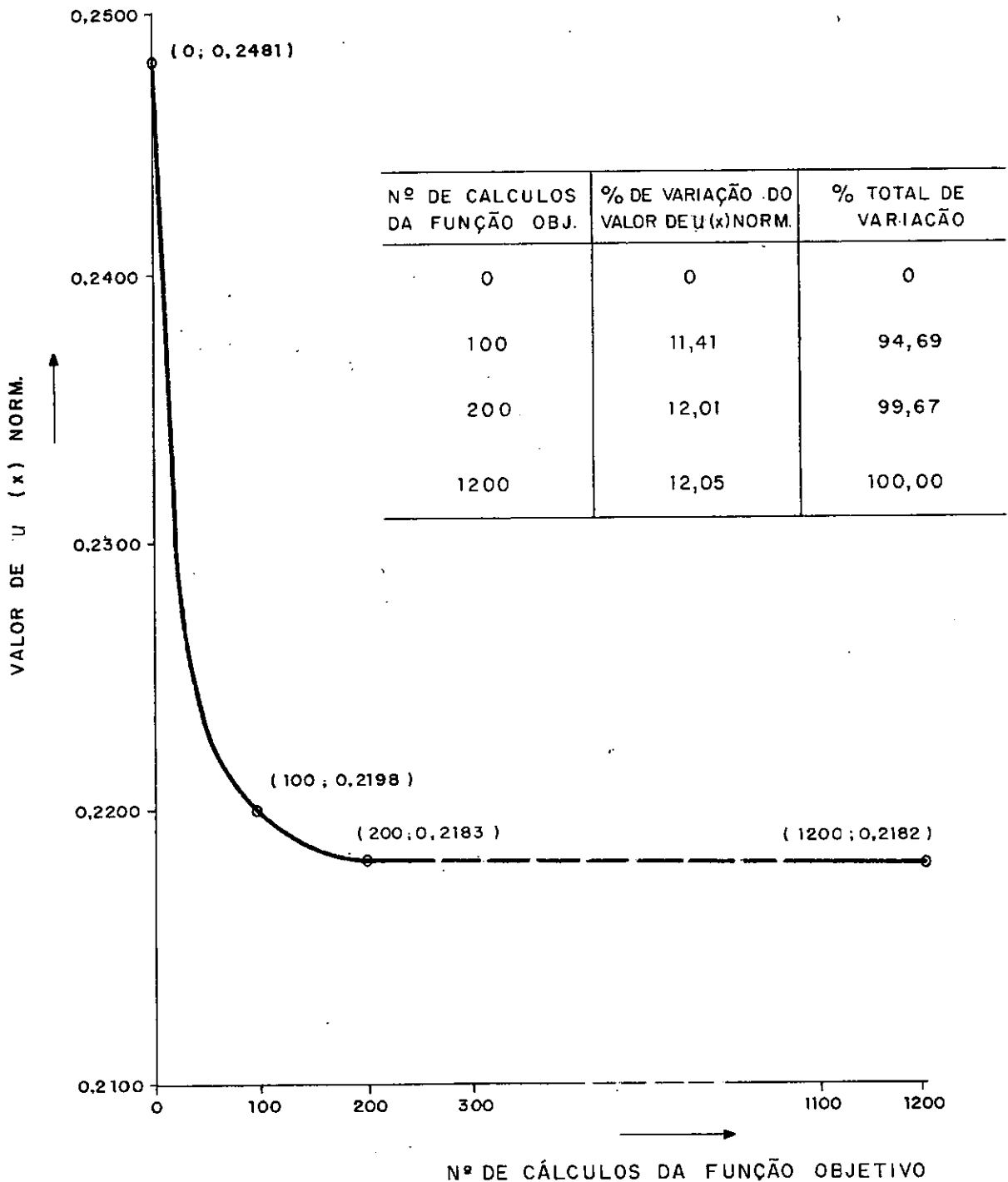
QUADRO Q.IV.4.2 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) "OBSERVADAS" (10 ANOS) E GERADAS (ÚLTIMOS 20 ANOS)

ANO	A R Q U I V O S									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	9.9956	5.7803	7.5480	7.9228	6.6033	12.8239	6.6481	7.6788	9.8131	7.1219
2	6.3668	6.8974	6.8800	7.6319	8.6517	8.5401	12.4820	7.0380	6.2978	9.9260
3	8.7950	11.6072	6.9891	6.5488	4.5401	6.4789	6.5514	8.6014	12.4336	8.5023
4	8.5153	7.5388	7.4773	5.3462	8.9212	8.4989	6.5351	11.4146	8.0347	15.9121
5	6.5776	5.4719	7.8618	8.7137	6.5141	7.3309	10.1237	11.3374	9.9846	7.9295
6	11.2323	8.1738	6.7278	6.8613	9.7974	7.9939	7.0509	8.1168	7.4998	8.3788
7	3.7958	8.1319	7.8803	13.9348	8.2030	8.0391	4.8369	7.5926	13.2345	8.7005
8	7.9892	8.6485	6.2191	8.1406	4.8635	6.1967	6.0574	7.7048	15.3071	11.3881
9	6.7137	10.3640	9.3233	7.4072	12.3284	13.2189	8.4675	5.3527	7.6404	7.5287
10	7.2842	6.3184	7.7325	7.2242	9.1174	7.4363	7.6750	8.9008	8.1113	6.3030
11	6.1912	7.3720	10.8319	10.2929	5.0666	10.5864	6.6130	6.2343	8.5284	5.4884
12	9.7523	5.2574	7.8921	5.5015	8.7207	8.4551	6.4020	5.8270	6.3510	7.8216
13	9.1015	7.4180	9.2223	3.7952	7.0051	8.4147	7.1711	7.7915	9.5835	4.7922
14	6.0444	8.5146	7.6850	10.6637	8.2046	7.8025	6.7689	5.4889	7.9140	8.5167
15	7.6992	8.8841	4.7964	6.5428	5.5026	6.9992	6.8023	11.8983	5.4059	4.9480
16	9.6051	7.1025	14.6131	5.9326	10.6924	14.5026	10.0365	7.0194	13.2805	8.6194
17	8.6566	11.2083	13.0253	9.0748	8.5505	13.5355	12.0650	6.5451	6.8591	11.9424
18	8.5072	5.1545	7.6151	6.8826	6.7207	8.1791	7.1900	7.4535	6.5789	7.9510
19	7.3120	7.5150	7.1750	9.5679	6.2646	7.3961	5.6028	9.4886	6.7553	6.9184
20	8.7073	6.9948	9.6555	11.0012	6.9015	9.0068	11.3761	7.7096	12.5899	6.1448
21	10.8895	9.7451	9.0116	6.0446	11.4929	8.5670	8.5163	6.2874	10.3552	9.8369
22	7.2496	6.5756	10.1585	9.4210	6.1311	10.2664	8.2020	6.1565	8.7509	10.8229
23	6.6157	11.1282	8.2318	10.9510	7.4676	6.8323	7.6044	4.9118	9.8452	8.4152
24	7.1117	12.0997	7.4899	12.8598	9.8603	6.7680	5.2025	9.5601	13.0347	6.1434
25	7.6604	8.3623	6.6899	8.5687	10.0932	6.7179	7.8503	12.7920	6.9821	5.1374
26	6.5670	6.5871	8.2001	6.9036	10.0754	5.7882	5.2804	6.7293	7.7104	7.8598
27	8.8941	6.1235	11.6733	6.1054	7.8495	15.3990	6.6976	13.5520	8.5156	7.4074
28	10.0754	11.2829	8.9350	8.8186	8.1990	8.1055	9.8572	13.0890	5.7576	6.7503
29	9.6911	7.2522	11.0781	7.8960	6.3048	6.1689	5.3518	7.7272	6.4296	7.9335
30	6.1217	5.3695	6.4462	7.0874	10.4852	9.0574	8.6828	4.1448	11.7174	8.6382

QUADRO Q.IV.4.3 - VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS (MM/DIA) "OBSERVADAS" (10 ANOS) E GERADAS (ÚLTIMOS 20 ANOS)

ANO	ARQUIVOS									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	10.9206	6.6708	5.3595	10.6177	5.9957	6.9748	13.2981	8.5106	7.5643	9.9113
2	14.5311	6.5074	8.2797	8.1661	7.8913	9.7238	7.0826	8.1142	6.8074	6.0237
3	9.2036	8.8894	9.6154	6.4096	8.3984	8.1829	6.9405	11.9304	5.5478	8.1295
4	6.2174	7.0500	8.9484	9.1680	8.5943	7.5354	7.2868	8.3963	7.7612	14.3152
5	6.7629	12.4357	6.4817	5.7260	7.4810	11.6195	4.4699	7.3214	7.5443	7.1431
6	8.1620	5.0681	10.2551	8.4854	7.3737	6.5506	10.3316	7.2697	14.2073	6.2782
7	7.4190	8.4803	4.9480	7.8022	9.2047	8.7725	5.8129	9.8405	9.8581	6.1714
8	4.2030	8.6745	7.0585	9.3942	7.9213	9.1533	6.3649	9.7348	6.5439	10.3063
9	8.4087	8.2331	8.7388	8.2823	8.1488	7.3905	5.9448	15.7085	6.9052	7.2024
10	9.5712	8.5523	8.5185	6.6218	8.5761	9.6590	8.8371	8.6992	6.5818	8.1482
11	4.2285	6.7376	6.3907	5.7528	7.6513	8.6508	4.9785	4.8422	5.7740	6.9970
12	5.0541	4.6713	5.8957	9.0348	6.5769	8.3644	6.8494	7.3281	6.1932	7.1758
13	7.1985	11.9359	4.8898	8.0586	7.0935	7.8007	10.1396	7.8175	5.7847	6.4646
14	6.7012	8.7583	11.9823	7.0813	6.4438	7.6286	5.8158	7.2042	8.4732	7.5042
15	4.7133	8.3914	7.3293	8.0724	9.4763	8.1040	7.5949	7.9031	8.5038	6.2862
16	8.1524	5.5045	18.3347	6.9477	16.9163	14.7148	9.4557	7.8573	6.7051	8.1087
17	6.5005	8.1028	5.5600	7.7572	6.0620	14.8072	6.7756	12.2687	9.7349	8.6169
18	7.4318	10.0680	9.2398	5.1995	7.0957	10.9147	7.5165	7.3414	6.9571	8.9190
19	8.7936	6.5526	10.8504	9.9531	7.9956	9.6831	7.5537	5.5661	20.6732	6.8203
20	8.6524	8.9973	8.7830	6.1713	7.7218	6.6269	8.1362	6.7880	7.0154	4.9012
21	10.5779	9.1032	8.4623	9.7004	8.0681	8.6687	5.6496	8.2492	12.8045	6.1895
22	9.3670	7.2091	8.9393	7.5254	9.9515	10.5262	10.9403	5.6651	7.9206	10.9553
23	13.2146	10.0201	10.5328	11.4763	8.5818	5.3597	6.3372	9.6897	6.5442	7.1884
24	10.3574	8.6124	7.2788	6.2470	5.6644	6.9258	8.0875	11.4512	8.0516	9.8612
25	10.9153	8.0389	5.1035	10.2812	7.8255	10.2069	5.1012	6.8516	6.3357	8.6586
26	8.7738	7.3618	7.6919	5.9187	6.5545	9.3859	8.2049	7.2121	10.9903	8.2377
27	6.7135	15.4883	6.7573	8.3482	6.8096	11.3194	9.7978	8.0781	5.8114	8.7922
28	9.8668	9.0891	8.2503	7.3674	9.1545	7.0906	6.7773	8.5522	7.0291	10.8065
29	11.6907	7.9901	9.3660	7.0331	7.7749	8.7018	9.2799	9.1805	8.4911	6.5178
30	9.4820	9.9568	7.9593	14.7757	7.0404	6.3703	10.6136	16.6539	9.3065	6.5430

FIGURA F. IV.1 FASE DE CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS
DESEMPENHO DO MODELO CHUVA-VAZÃO
VARIAÇÃO DO VALOR DE $\tilde{u}(x)$ NORM. PARA O ARQUIVO 7



amostra de 30 arquivos disponível.

A tendência observada de rápida convergência nas primeiras iterações foi também observada nos demais arquivos, em acordo com as experiências realizadas por CANEDO¹⁰ que determina que 500 iterações são suficientes para a otimização quando o registro de calibração é superior a 3 anos, e os valores iniciais dos parâmetros não são completamente desconhecidos para a região de projeto. Vale salientar que o processo de otimização utilizado não é muito dependente dos valores iniciais dos parâmetros.

Nesse arquivo a alteração do valor da função objetivo foi extremamente significativa nas 100 primeiras iterações do modelo, alcançando 94% do percentual de variação nos 1200 cálculos realizados. Verificou-se, portanto, que o limite adotado (1200 cálculos) para a minimização da função objetivo, foi mais do que suficiente.

Para os demais arquivos ocorreu algo semelhante, existindo, sempre, um número bastante elevado de cálculos da função objetivo utilizados para o ajuste "fino" dos valores dos parâmetros. No quadro (Q.IV.3) pode-se observar que na fase de calibração dos parâmetros, em um elevado número de arquivos, o percentual de variação do valor da função objetivo não foi muito "significativo", situando-se em torno de 10% somente.

Este fato é explicado pelo conjunto inicial de parâmetros, quadro (Q.III.3), adotado na fase de calibração dos arquivos. Com o objetivo de permitir um melhor ajuste "fino" dos valores dos parâmetros, a escolha dos valores iniciais dos mesmos foi realizada após a execução de algumas simulações preliminares, com diferentes conjuntos de parâmetros iniciais e arquivos da população.

Uma seleção dos melhores valores para os parâmetros, obtidos nestas primeiras simulações, conduziu ao conjunto inicial adotado para a calibração do modelo. Contudo, isto foi ape

nas uma opção de cálculo sem grande influência nos resultados finais do trabalho que, certamente, seriam alcançados adotando-se qualquer outro conjunto inicial de parâmetros para o ajuste do modelo.

Referente, ainda, a fase de calibração dos parâmetros do modelo, resta falar sobre as fronteiras ou limites de variação impostos aos parâmetros do mesmo. Uma vez que a "bacia hidrográfica" do estudo é fictícia, isto é, foi definida a partir dos valores fornecidos aos parâmetros do modelo SWM-IV, inicialmente optou-se por permitir, durante a fase de ajuste do modelo, que os parâmetros variassem sem maiores restrições.

A liberdade de variação pretendida foi alcançada ao impor-se em 9999 e zero, respectivamente, os valores das fronteiras superior e inferior dos diversos parâmetros. Deve ser ressaltado que o coeficiente de amortecimento do escoamento no canal e as ordenadas do histograma de retardo da bacia são limitados entre a unidade e zero, além do somatório das ordenadas do histograma, obrigatoriamente, ser igual a unidade.

Foram verificados bons ajustes das descargas diárias geradas a partir dos conjuntos "ótimos" de parâmetros obtidos na fase de calibração do modelo, quando comparadas as vazões reais "observadas". Contudo, para as vazões excessivamente altas, ou seja, àquelas referentes as cheias ocorridas na "bacia hidrográfica" do estudo, observou-se, em alguns casos dos registros extendidos, um amortecimento significativo das descargas geradas.

Atribuindo-se esta ocorrência a larga faixa de variação permitida para os parâmetros, foi reiniciado o trabalho de ajuste dos parâmetros do modelo IBBITT e O'DONNELL, procurando-se restringir a variação dos mesmos. Adotou-se, então, os valores .999 e zero, respectivamente, para as fronteiras externas superior e inferior dos parâmetros. Os resultados obtidos foram considerados bastante satisfatórios, e são apresentados nesse trabalho.

IV.2- FASE DE PREVISÃO E ANÁLISE DOS VALORES DAS CHEIAS PARA OS CASOS ESTUDADOS

A última etapa do trabalho constou das previsões das magnitudes das cheias através da utilização da distribuição GUMBEL, para os períodos de retorno de 50, 100 e 1000 anos. Sobre estes resultados foram comparados os desempenhos dos arquivos contendo os registros estendidos através do modelo matemático chuva-vazão adotado, em relação aos compostos apenas por descargas "observadas".

Os valores das descargas diárias máximas, obtidos durante todo o processo de geração da população de dados, são os apresentados nos quadros (Q.IV.2.1) até (Q.IV.2.3), e (Q.IV.4.1) até (Q.IV.4.3). Estes resultados serviram de base para a elaboração dos quadros (Q.IV.5.1), (Q.IV.5.2) e (Q.IV.5.3), em concordância com os três casos estudados, a saber:

- Caso 1 - arquivos com 30 anos de vazões diárias "observadas";
- Caso 2 - arquivos contendo apenas os 10 anos iniciais "observados";
- Caso 3 - arquivos com registros de 30 anos, sendo 10 anos de vazões diárias "observadas" e os últimos 20 anos de valores gerados pelo modelo "chuva-vazão" adotado.

A priori de qualquer análise sobre os valores das previsões das cheias, julgou-se de interesse a verificação da manutenção da média dos eventos máximos anuais, principalmente, para os casos dos arquivos com registros estendidos. Em outras palavras, denominando por " μ_0 ", a média dos eventos máximos "observados", e por " μ_1 ", a média das vazões diárias máximas anuais dos arquivos pertencentes ao Caso 3, deseja-se verificar se não existe, a um nível de significância α , diferença significativa entre μ_0 e μ_1 .

QUADRO Q.IV.5.1 - PREVISÃO DAS CHEIAS - DISTRIBUIÇÃO GUMBEL
ARQUIVOS CONTENDO 30 ANOS "OBSERVADOS"
VALORES EM MM/DIA

Nº ARQ	MÉDIA	D: PADRÃO	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
			50	100	1000
1	8,2302	2,1279	13,7464	14,9048	18,7325
2	8,4315	2,3494	14,5220	15,8010	20,0272
3	8,3955	2,1610	13,9977	15,1742	19,0616
4	8,0065	2,6593	14,9003	16,3481	21,1318
5	7,8614	2,1420	13,4143	14,5804	18,4336
6	8,1807	2,1841	13,8426	15,0316	18,9605
7	8,7100	2,3523	14,8078	16,0884	20,3198
8	7,7011	2,0540	13,0259	14,1441	17,8390
9	8,1369	2,0164	13,3641	14,4618	18,0890
10	8,3317	2,1750	13,9701	15,1542	19,0668
11	8,3813	1,8868	13,2715	14,2997	17,6938
12	8,1052	2,3891	14,2986	15,5992	19,8969
13	8,4168	2,0765	13,7999	14,9303	18,6657
14	8,2658	2,4156	14,5278	15,8428	20,1881
15	8,2599	1,8956	13,1739	14,2059	17,6158
16	8,9115	2,4384	15,2326	16,5600	20,9463
17	7,9687	2,1843	13,6312	14,8203	18,7496
18	8,2232	2,5387	14,8043	16,1864	20,7531
19	9,0896	2,6100	15,8556	17,2764	21,9714
20	7,9600	2,3007	13,9242	15,1767	19,3153
21	8,3955	2,3948	14,6036	15,9074	20,2153
22	8,6388	2,2182	14,3891	15,5967	19,5869
23	8,5146	2,7036	15,5233	16,9951	21,8585
24	8,3624	1,9986	13,5435	14,6315	18,2267
25	8,0233	1,8946	12,9348	13,9663	17,3744
26	8,9383	2,2510	14,7737	15,9991	20,0483
27	7,7737	1,9997	12,9577	14,0463	17,6435
28	8,6676	2,4382	14,9882	16,3155	20,7015
29	8,1789	2,8314	15,5190	17,0604	22,1538
30	7,8885	1,9597	12,9687	14,0355	17,5608

QUADRO Q.IV.5.2 - PREVISÃO DAS CHEIAS - DISTRIBUIÇÃO GUMBEL
ARQUIVOS CONTENDO 10 ANOS "OBSERVADOS"
VALORES EM MM/DIA

Nº ARQ	MÉDIA	D: PADRÃO	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
			50	100	1000
1	6,7774	1,8810	11,6535	12,6775	16,0611
2	7,2849	1,8449	12,0676	13,0719	16,3907
3	7,7769	1,9231	12,7623	13,8093	17,2687
4	10,0861	3,2468	18,5030	20,2706	26,1112
5	6,9471	2,2084	12,6721	13,8743	17,8470
6	8,1967	2,7880	15,4241	16,9418	21,9570
7	7,8269	2,0551	13,1543	14,2731	17,9698
8	8,0576	1,2747	11,3620	12,0559	14,3489
9	8,7357	2,2542	14,5792	15,8064	19,8613
10	8,3033	1,9976	13,4818	14,5693	18,1627
11	7,7265	2,0847	13,1307	14,2656	18,0156
12	7,8932	1,9587	12,9709	14,0372	17,5607
13	7,4639	0,8515	9,6714	10,1350	11,6668
14	7,9713	2,2921	13,9150	15,1628	19,2860
15	7,9540	2,3682	14,0931	15,3824	19,6424
16	8,6558	2,4285	14,9514	16,2735	20,6421
17	7,6428	2,2211	13,4006	14,6098	18,6052
18	8,3738	1,8522	13,1754	14,1828	17,5157
19	9,8357	2,9301	17,4315	19,0266	14,2975
20	9,1691	2,7666	16,3410	17,8472	22,8239
21	8,5400	2,8254	15,8642	17,4023	22,4848
22	8,0562	1,9713	13,1664	14,2395	17,7855
23	7,8204	1,7840	12,4451	13,4162	16,6254
24	8,0673	1,4943	11,9411	12,7546	15,4427
25	7,9585	0,8817	10,2442	10,7242	12,3103
26	8,5562	1,5431	12,5564	13,3964	16,1721
27	7,6369	2,5713	14,3025	15,7023	20,3217
28	9,5526	2,5620	16,1941	17,5889	22,1976
29	7,9321	2,4756	14,3498	15,6975	20,1507
30	8,3629	2,5639	15,0093	16,4051	21,0171

QUADRO Q.IV.5.3 - PREVISÃO DAS CHEIAS - DISTRIBUIÇÃO GUMBEL
ARQUIVOS CONTENDO 10 ANOS "OBSERVADOS" E 20
ANOS GERADOS - VALORES EM MM/DIA

Nº ARQ.	MÉDIA	D. PADRÃO	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
			50	100	1000
1	7,8727	1,9074	12,8175	13,8559	17,2871
2	8,1938	2,1453	13,7552	14,9231	18,7822
3	8,0415	1,9025	12,9735	14,0092	17,4315
4	7,9988	2,6617	14,8987	16,3477	21,1357
5	7,7388	2,1038	13,1926	14,3379	18,1223
6	8,2946	2,1320	13,8214	14,9820	18,8172
7	8,0967	2,3900	14,2924	15,5935	19,8927
8	7,9617	1,9366	12,9820	14,0362	17,5198
9	8,0234	1,9789	13,1534	14,2307	17,7904
10	8,2710	2,1500	13,8446	15,0151	18,8826
11	7,9906	1,6697	12,3190	13,2279	16,2314
12	7,9626	2,0335	13,2341	14,3411	17,9991
13	8,5022	2,1033	13,9545	15,0995	18,8830
14	8,1214	2,2605	13,9814	15,2120	19,2784
15	8,0376	2,0128	13,2555	14,3513	17,9720
16	8,8369	2,5792	15,5231	16,9272	21,5669
17	7,6567	2,0091	12,8650	13,9588	17,5729
18	8,1381	2,5004	14,6200	15,9812	20,4790
19	9,0434	2,6388	15,8841	17,3207	22,0676
20	8,1260	2,3069	14,1063	15,3621	19,5119
21	8,4595	2,4874	14,9077	16,2618	20,7363
22	8,4384	2,1935	14,1247	15,3188	19,2646
23	8,2600	2,6455	15,1181	16,5583	21,3172
24	8,1125	2,0179	13,3435	14,4420	18,0718
25	8,0014	1,9843	13,1454	14,2256	17,7950
26	8,9137	2,2097	14,6421	15,8451	19,8201
27	7,7325	2,0451	13,0342	14,1475	17,8264
28	8,7342	2,6457	15,5927	17,0330	21,7923
29	8,2807	3,0984	16,3128	17,9995	23,5731
30	7,9724	1,9419	13,0065	14,0637	17,5569

Isto é, com o risco de erro de 1º tipo igual a α , ou um grau de confiança $(1-\alpha)$, deseja-se verificar a validade da afirmação $\mu_1 = \mu_0$, que representará a hipótese nula, contra a hipótese alternativa $\mu_1 \neq \mu_0$. Matematicamente este teste é expresso como:

Teste de Hipóteses:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_0 = \text{cte}$$

(IV.4)

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_0 = \text{cte}$$

a um nível de significância α

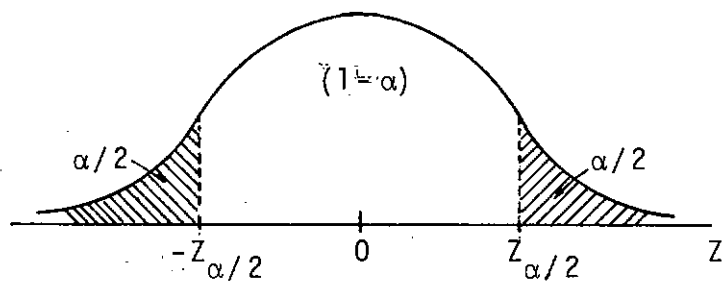
Considerando a variável aleatória média amostral, μ_1 , com distribuição assintoticamente normal de média μ e desvio padrão σ/\sqrt{n} , onde "n" é o total de elementos da amostra, pode-se escrever:

$$\mu_1 \approx N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right) \quad (\text{IV.5})$$

Representando por z , a variável determinada como a seguir:

$$z = \frac{\mu_1 - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}; \quad z \approx N(0,1) \quad (\text{IV.6})$$

Ou seja, z é uma variável reduzida que tem distribuição assintoticamente normal de média zero e variância unitária, pode-se, então, em referência ao teste de hipóteses (IV.4), fazer a seguinte construção gráfica:



Logo, o Critério de Decisão do teste será:

$$\frac{L_1 - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} = -z_{\alpha/2} \Rightarrow L_1 = \mu_0 - z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (IV.7)$$

$$\frac{L_2 - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} = z_{\alpha/2} \Rightarrow L_2 = \mu_0 + z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- i) se $\mu_1 < L_1$ ou $\mu_1 > L_2 \Rightarrow$ rejeita-se H_0
- ii) se $L_1 < \mu_1 < L_2 \Rightarrow$ aceita-se H_0

tudo a um nível de significância $\alpha\%$.

Para um grau de confiança $(1-\alpha)$ de 95%, ou seja, a um nível de significância $\alpha = 5\%$, tem-se $z_{\alpha/2} = 1,96$, o que permite obter:

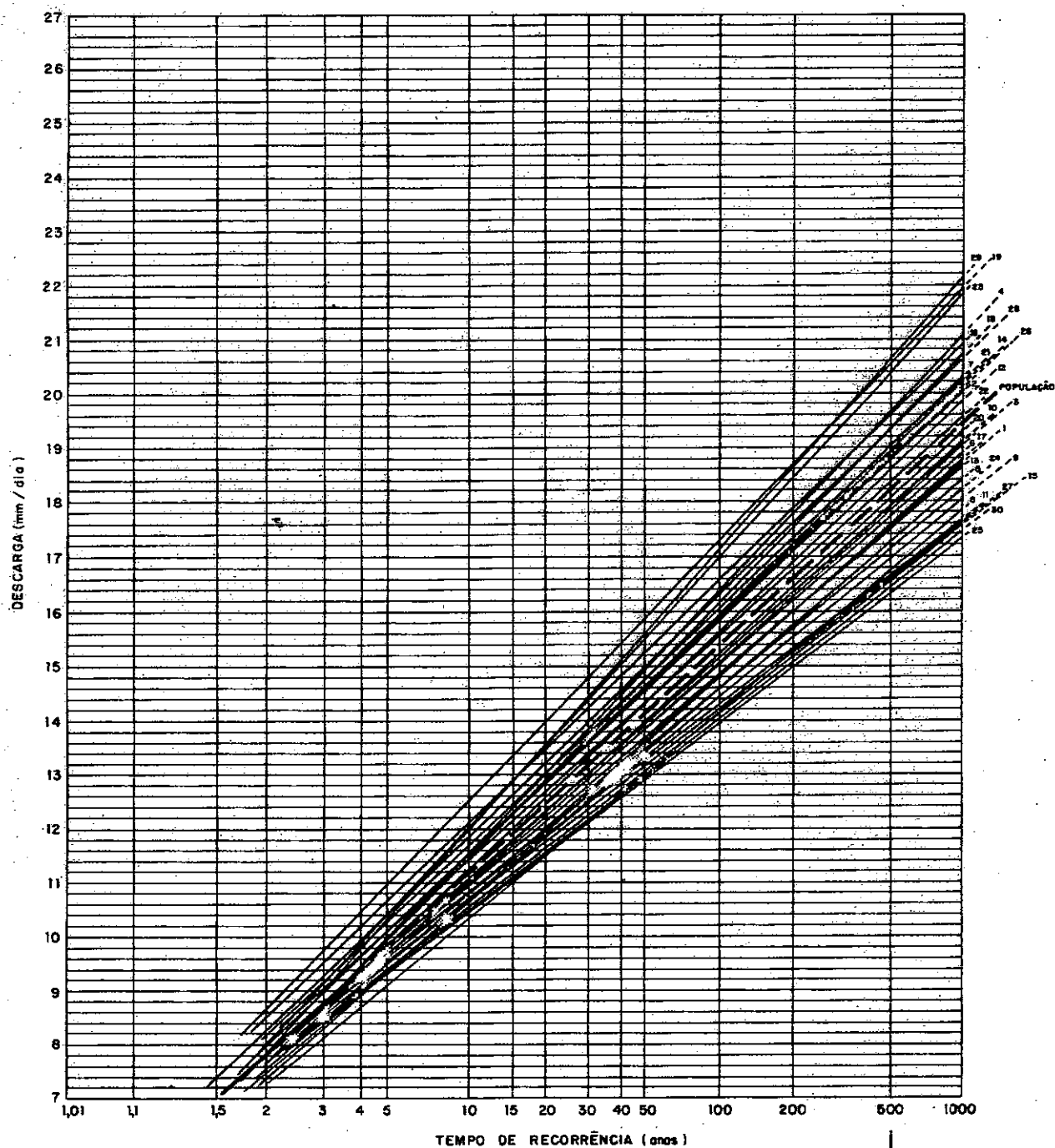
$$L_1 = 8,2983 - 1,96 \cdot \frac{2,2571}{\sqrt{900}} = 8,1508$$

$$L_2 = 8,2983 + 1,96 \cdot \frac{2,2571}{\sqrt{900}} = 8,4458$$

Sendo $\mu_1 = 8,1938$, verifica-se que $L_1 < \mu_1 < L_2$, logo aceita-se $H_0 : \mu_1 = \mu_0$, a um nível de significância $\alpha = 5\%$. Igual resultado poderá ser obtido com a média das descargas máximas anuais dos arquivos do Caso 2, em relação ao teste de hipóteses.

Tendo por base a conclusão obtida a partir da formulação do teste de hipóteses, iniciou-se então a análise das previsões das cheias referentes aos períodos de retorno selecionados. Foram elaboradas as figuras (F.IV.2.1) até (F.IV.2.4) para possibilitar uma melhor visualização dos resultados alcançados.

FIGURA F. IV. 2.1 PREVISÃO DAS CHEIAS REFERENTES AO CASO 1 ESTUDADO



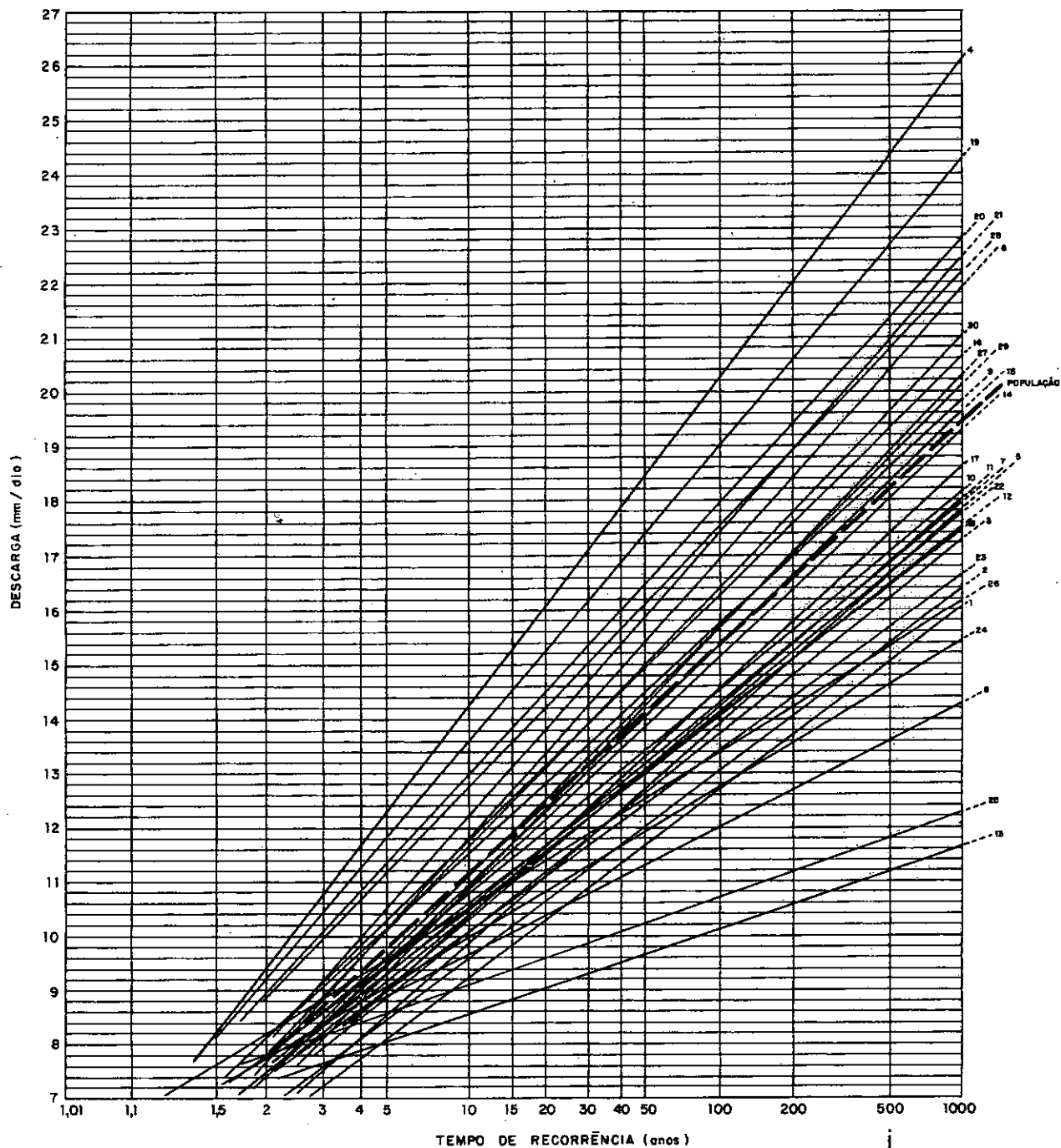


FIGURA F. IV.2.3 PREVISÃO DAS CHEIAS REFERENTES AO CASO 3 ESTUDADO

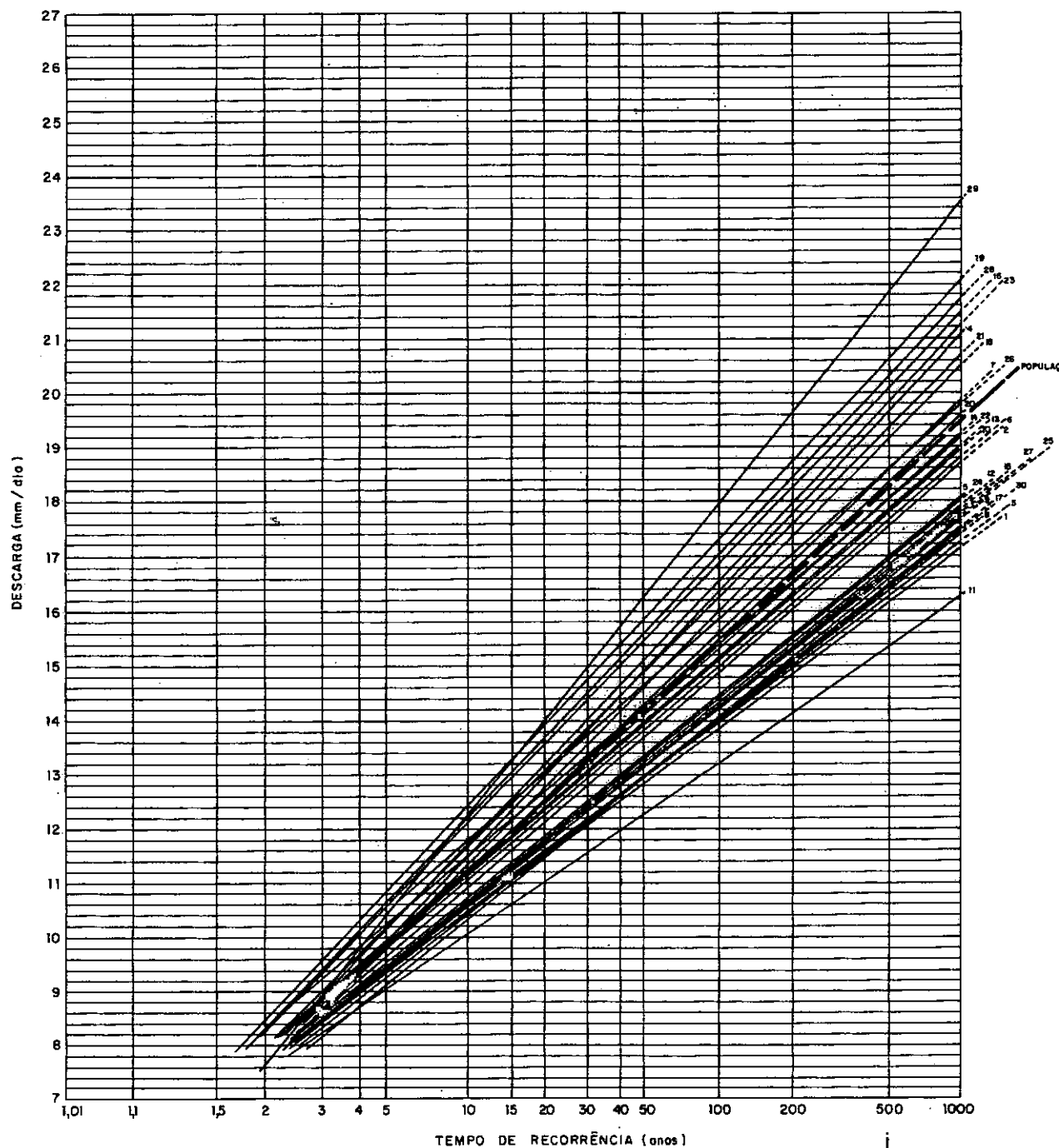
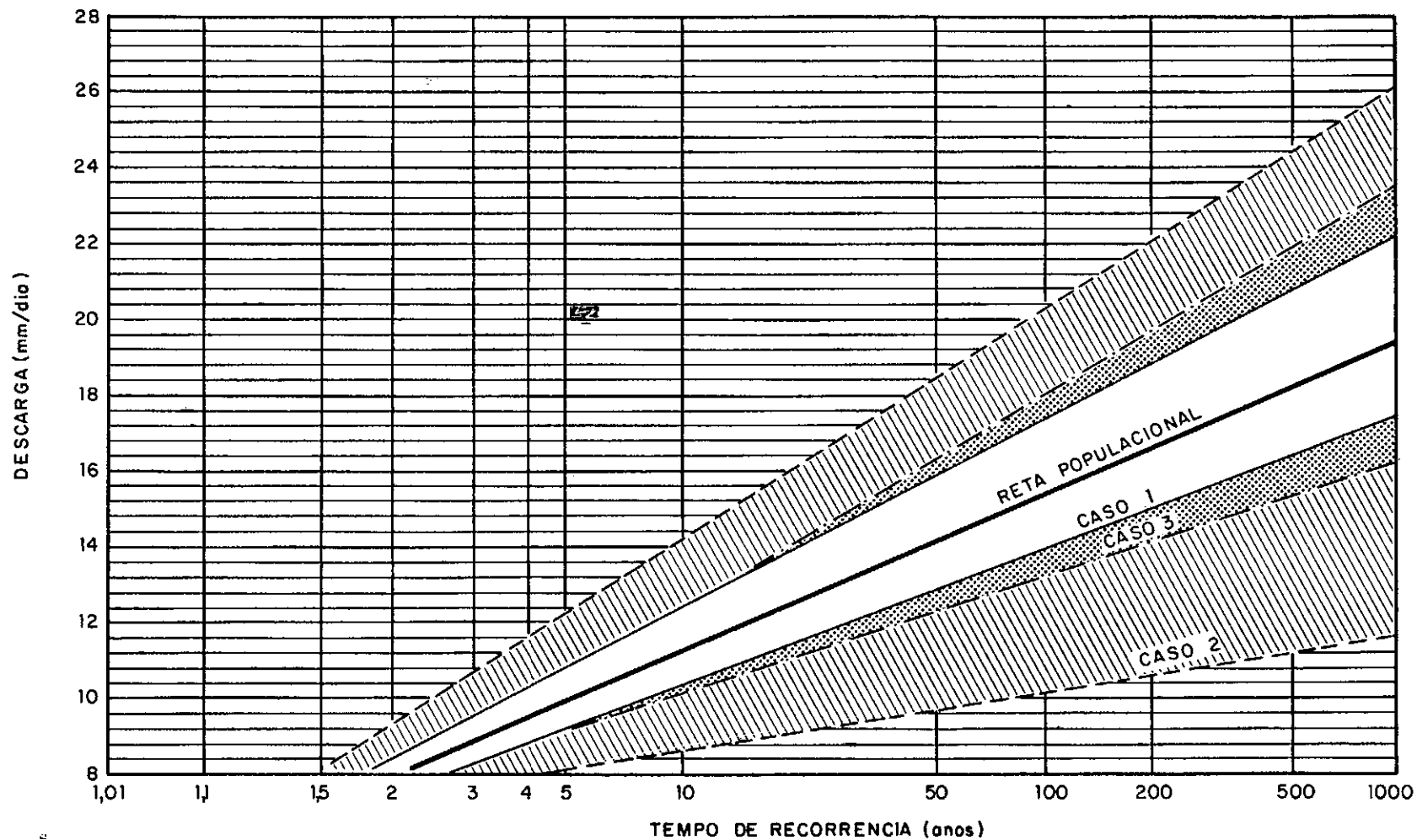


FIGURA F.IV.2.4 - ENVOLTÓRIAS DAS PREVISÕES DAS CHEIAS REFERENTES
AOS CASOS ESTUDADOS



Para o traçado de tais figuras adotou-se o papel de probabilidades da distribuição GUMBEL, para possibilitar uma representação linear das previsões das cheias, referentes ao conjunto de arquivos dos três casos estudados.

A figura referente ao Caso 1. mostra que para partições de 30 anos de registros da população gerada, são obtidas previsões das cheias, para os diversos períodos de retorno, bastante próximas dos valores "verdadeiros". As retas referentes aos 30 arquivos considerados apresentaram-se concentradas em torno da reta populacional.

Quando foram selecionados apenas os dez anos iniciais de cada um dos 30 arquivos, caracterizando o Caso 2, as previsões das cheias apresentaram uma dispersão acentuada em relação a reta populacional. Fato já esperado, principalmente através dos resultados obtidos por BENSON, BOUGHTON e VICTOROV, os quais indicam que a utilização de poucos anos de registros, para prever cheias com pequenas probabilidades de ocorrência, não é aconselhável.

Com a extensão desses registros, através do procedimento descrito neste trabalho, foi obtida uma configuração com menores amplitudes de variação em relação a reta populacional, como pode ser observado na figura (F.IV.2.3), referente ao Caso 3 estudado.

Além de uma verificação visual, efetuou-se a quantificação matemática da diminuição dos desvios das previsões referentes ao Caso 3 em relação aos valores "verdadeiros". Com a finalidade de confirmar que a extensão dos registros fluviomêtricos, com o uso da metodologia descrita, possibilitou uma melhora nos valores das previsões, quando comparados com os resultados dos arquivos de apenas 10 anos de descargas diárias.

Tomando por base os períodos de retorno de 50, 100 e 1000 anos, elaborou-se inicialmente o quadro (Q.IV.6) com algumas características dos resultados, do qual pode-se concluir que:

- a) Existiu, como esperado, uma evolução da amplitude de variação das previsões das cheias, nos três casos analisados, em função da diminuição da probabilidade de ocorrência da cheia requerida.
- b) As amplitudes referentes ao Caso 3 aproximaram-se bastante das do Caso 1, porém, o Caso 2 apresentou amplitudes de variação extremamente elevadas.
- c) A extensão dos registros de 10 para 30 anos, não só possibilitou uma correção nos valores das previsões de maiores desvios em relação ao valor populacional, como também influenciou, eficientemente, as previsões no seu conjunto, refletindo numa elevação dos valores médios das previsões.

Como proposta para descrever o comportamento das previsões das cheias, nos três casos do trabalho, estudou-se as distribuições de frequências das amostras de 30 valores de descargas, para cada um determinado tempo de recorrência. Foram, então, levantados os índices de tendência central, dispersão, assimetria e curtose, cujos resultados são apresentados no quadro (Q.IV.7), a seguir.

A média das previsões, para cada período de retorno, reflete bem a tendência central das distribuições. Neste aspecto, os resultados demonstram a melhora obtida após a extensão dos registros fluviométricos.

A dispersão indica o grau de afastamento dos dados numéricos em torno do seu valor médio. Dispõe-se de várias medidas de dispersão, sendo uma delas a amplitude total, cujos valores foram apresentados no quadro (Q.IV.6). A variância ou, também denominada, momento de ordem 2 centrado na média, e a sua raiz quadrática positiva, conhecido por desvio padrão, são outros índices de avaliação da dispersão.

No quadro (Q.IV.7), pelos resultados obtidos para a variância das previsões, verifica-se a significativa diminuição da dispersão das previsões referentes ao Caso 3, em comparação aos índices dos arquivos com apenas 10 anos de descargas diárias.

QUADRO Q.IV.6 - ALGUNS VALORES CARACTERÍSTICOS NOS RESULTADOS
DAS PREVISÕES DAS CHEIAS

CASOS ESTUDADOS	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
	50	100	1000
POPULAÇÃO DE VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS "OBSERVADAS" (900 ANOS)	14,1495	15,3782	19,4384
CASO 1 (QUADRO Q.IV.5.1)			
VALOR MÁXIMO DAS PREVISÕES	15,8556	17,2764	22,1538
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	14,1438	15,3713	19,4276
VALOR MÍNIMO DAS PREVISÕES	12,9348	13,9663	17,3744
AMPLITUDE DAS PREVISÕES	2,9208	3,3101	4,7794
CASO 2 (QUADRO Q.IV.5.2)			
VALOR MÁXIMO DAS PREVISÕES	18,5030	20,2706	26,1112
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	13,6938	14,8534	18,6849
VALOR MÍNIMO DAS PREVISÕES	9,6714	10,1350	11,6668
AMPLITUDE DAS PREVISÕES	8,8316	10,1356	14,4444
CASO 3 (QUADRO Q.IV.5.3)			
VALOR MÁXIMO DAS PREVISÕES	16,3128	17,9995	23,5731
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	13,9567	15,1669	19,1659
VALOR MÍNIMO DAS PREVISÕES	12,3190	13,2279	16,2314
AMPLITUDE DAS PREVISÕES	3,9938	4,7716	7,3417

A assimetria é definida como o grau de desvio, ou afastamento, da simetria de uma distribuição. Se uma determinada distribuição tem uma "cauda" mais longa à direita da ordenada máxima do que à esquerda diz-se que a distribuição tem assimetria positiva. Por outro lado, ocorrendo o inverso, isto é, se ela é desviada a esquerda, indica que tem assimetria negativa. Quando é perfeitamente simétrica, como por exemplo a distribuição Normal, a sua assimetria é nula.

Um dos possíveis índices para quantificar a assimetria de uma distribuição é o coeficiente quartílico de assimetria, que representaremos por "t", sendo definido por:

$$t = \frac{Q_3 - 2Q_2 + Q_1}{Q_3 - Q_1} \quad (\text{IV.8})$$

onde:

Q_1, Q_2, Q_3 - representam o 1º, 2º e 3º quartis, respectivamente, da distribuição.

O intervalo de variação do índice t é (-1,1), e os resultados do quadro (Q.IV.7) mostram que as distribuições de frequência dos valores das descargas, para os períodos de retorno selecionados, possuem assimetrias positivas fracas. Podendo, inclusive, serem consideradas como aproximadamente simétricas, principalmente, aquelas referentes aos Casos 1 e 3.

Finalmente, a curtose reflete o grau de achatamento de uma distribuição, considerado usualmente em relação ao formato da distribuição Normal. As distribuições com mesma curtose que a Normal são chamadas "mesocúrticas", enquanto que aquelas com picos mais altos são denominadas "leptocúrticas", e as com topos mais achatados são as "platicúrticas".

Um dos possíveis índices para avaliar o grau de achatamento de uma distribuição, baseado nos quartis e percentis da mesma, é conhecido por coeficiente percentílico de curtose, representado por "k" e definido por:

$$k = \frac{\frac{Q_3 - Q_1}{2}}{P_{90} - P_{10}} \quad (\text{IV.9})$$

onde:

$\frac{Q_3 - Q_1}{2}$ - denominada amplitude semi-interquartilica

$P_{10}; P_{90}$ - representam o 1º e 9º percentis, respectivamente, da distribuição.

O valor básico desse índice, referente a distribuição Normal, é de 0,263. Comparando os resultados do quadro (Q.IV.7), ao valor básico, verifica-se a significativa proximidade dos mesmos. Contudo, rigorosamente poderíamos classificar as distribuições referentes aos Casos 1 e 3 como leptocúrticas, enquanto que as do Caso 2, por apresentarem coeficientes inferiores ao valor 0,263, seriam chamadas mesocúrticas.

Pelos pequenos índices de assimetria apresentados pelas distribuições estudadas, e por possuírem formatos bastante similares ao da distribuição Normal, seria razoável dizer que tais distribuições são assintoticamente normais. Esta aproximação permite portanto a utilização das propriedades inerentes às distribuições normais.

Pode-se concluir, com base nos resultados deste trabalho, que o uso da metodologia descrita é um procedimento bastante recomendável e satisfatório, ou seja, a adoção de modelos matemáticos do tipo "chuva-vazão" para a extensão dos registros fluviométricos de uma bacia hidrográfica, com a finalidade de efetuar previsões de cheias associadas a longos períodos de retorno, resultou em um critério bastante eficaz em relação aos objetivos requeridos.

Contudo, deve ser ressaltado que enquanto os registros com apenas 10 anos de descargas diárias são, nitidamente, insuficientes para prever cheias com pequenas probabilidades de ocorrência, não está sendo afirmado que 30 anos seja o comprimento ideal para tais previsões. Porém, em termos comparativos, os

resultados alcançados para os valores das previsões, após a extensão efetuada nos arquivos, comprovaram a eficácia da metodologia.

QUADRO Q.IV.7 - PRINCIPAIS ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS DAS PREVISÕES DAS CHEIAS.

CASOS ESTUDADOS	PERÍODO DE RETORNO (ANOS)		
	50	100	1000
POPULAÇÃO DE VAZÕES DIÁRIAS MÁXIMAS "OBSERVADAS" (900 anos)	14,1495	15,3782	19,4384
CASO 1			
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	14,1438	15,3713	19,4276
VARIÂNCIA DAS PREVISÕES	0,7063	0,9390	1,9768
COEF. QUARTÍLICO DE ASSIMETRIA	0,1700	0,1422	0,1384
COEF. PERCENTÍLICO DE CURTOSE	0,3092	0,3029	0,3000
CASO 2			
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	13,6938	14,8534	18,6849
VARIÂNCIA DAS PREVISÕES	3,9014	5,1452	10,5976
COEF. QUARTÍLICO DE ASSIMETRIA	0,4042	0,3418	0,2419
COEF. PERCENTÍLICO DE CURTOSE	0,2343	0,2380	0,2444
CASO 3			
VALOR MÉDIO DAS PREVISÕES	13,9567	15,1669	19,1659
VARIÂNCIA DAS PREVISÕES	1,0621	1,4275	3,0468
COEF. QUARTÍLICO DE ASSIMETRIA	0,0507	0,0787	0,1438
COEF. PERCENTÍLICO DE CURTOSE	0,2899	0,2908	0,2894

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Finalizar um trabalho técnico não significa exaurir o tema relativo ao assunto tratado, mas sim, alcançar-se o objetivo inicial pretendido. Neste contexto, o presente capítulo foi dividido em duas seções, a saber:

V.1- Conclusões Referentes ao Trabalho

V.2- Recomendações para Futuras Pesquisas

Na primeira procurar-se-á descrever o desempenho dos modelos matemáticos utilizados, as premissas e considerações adotadas durante o desenvolvimento do trabalho, enfim, os principais resultados alcançados. A outra seção apresenta algumas variantes de pesquisa, certamente dentre as muitas existentes, para um aprofundamento do tema deste estudo, ou ainda, temas em que a metodologia deste trabalho será mais uma ferramenta disponível.

V.1- CONCLUSÕES REFERENTES AO TRABALHO

A verificação da potencialidade do uso de modelos matemáticos do tipo "chuva-vazão", para a extensão dos registros fluviométricos de uma bacia hidrográfica, principalmente, com a finalidade de prever cheias associadas a longos períodos de retorno, constituiu-se no objetivo deste trabalho.

O desenvolvimento do trabalho obedeceu a uma ordem cronológica bem definida, iniciando-se com a seleção dos modelos utilizados na geração dos registros populacionais necessários ao estudo, e tendo sequência com todos os demais procedimentos já descritos. Portanto, julga-se relevante firmar as conclusões e os resultados da pesquisa dentro da sua própria cronologia.

A fixação do comprimento da população de precipitações, dados de evapotranspiração e descargas diárias em 900 anos, foi

bastante adequada. Permitiu, por exemplo, obter os valores "verdadeiros" das cheias referentes a 50, 100 e 1000 anos de recorrência, que foram os períodos selecionados para o estudo. Neste último caso, considerou-se válida a hipótese de que com uma população de 900 anos ter-se-ia o valor verdadeiro referente a um período de retorno de 1000 anos; o que aliás está em pleno acordo com BENSON⁵.

Além disso, possibilitou o estabelecimento de 30 anos tras, de igual comprimento de registros (30 anos), que serviram de base para o desenvolvimento da metodologia proposta, e obtenção dos resultados do trabalho.

Finalmente, este número de anos compatibilizou a necessidade de um grande período de dados e os limites estabelecidos para a geração e armazenamento das variáveis. Basta verificar que foram gerados 328500. valores de chuvas diárias e um igual número de descargas, necessitando de 60 arquivos para a sua armazenagem.

Considerando-se a inexistência de uma bacia hidrográfica com um histórico de chuvas e descargas diárias tão extenso como o requerido para a formulação da população, foi necessário o uso de procedimentos capazes de gerar tais dados.

A maneira pela qual foi efetuada esta geração acha-se descrita nos capítulos anteriores, sendo os resultados obtidos bastante significativos. Neste capítulo efetuar-se-á uma rápida apreciação dos modelos matemáticos adotados.

O modelo utilizado na formulação dos registros de chuvas diárias teve bom desempenho, fornecendo sempre resultados compatíveis com o posto pluviométrico básico (Posto Caixa D'água), mesmo considerando-se que o conjunto de parâmetros fornecido refletia índices médios para cada dois meses (quadro (Q.III.1)).

O mesmo pode-se dizer do modelo SWM-IV utilizado na geração das descargas "observadas". Trata-se de um modelo largamente empregado nas mais diversas regiões, com uma performance

bastante conhecida.

Uma vez determinados e armazenados os valores das chuvas e vazões da população, a próxima etapa referia-se a calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão utilizado para a extensão dos registros fluviométricos.

A escolha de registros com 5 anos de dados mostrou-se propícia pelos bons ajustes alcançados para os diversos arquivos de descargas considerados. A mesma deveu-se a recomendação de LINSLEY e FRANZINI³⁶ e ao trabalho desenvolvido por CANEDO¹⁰. Deve ser ressaltado contudo, que a simplificação efetuada na avaliação da função objetivo, ou seja, considerar os valores das descargas iguais ou superiores a um "limite" pré-estabelecido (1,5 mm/dia) no seu cálculo, embora tenha fornecido uma melhora nos resultados do presente trabalho, merece uma pesquisa maior quando a sua real influência no resultado final da calibração.

O fato de mais de 90% da variação do valor da função objetivo, relacionar-se com as 200 primeiras iterações do modelo, aproximadamente, para o total de 1200 cálculos da função objetivo permitidos, conduz à certeza da validade do uso do método de ROSENBROCK⁵⁴.

O rápido ajuste dos parâmetros do modelo às "características" da bacia hidrográfica do estudo, através do processo de ROSENBROCK⁵⁴, indica uma grande potencialidade de aplicação das rotinas de calibração automática de parâmetros em modelos do tipo "chuva-vazão".

Os arquivos de descargas diárias compostos após a calibração dos parâmetros do modelo, e a extensão de 10 para 30 anos do comprimento dos seus registros, demonstraram ser homogêneos com as amostras populacionais, conforme os testes realizados, indicando a boa calibração do modelo à "bacia hidrográfica".

As previsões das cheias para os arquivos que foram estendidos, em comparação aos valores correspondentes aos arquivos com apenas 10 anos de dados, aproximaram-se muito mais dos

valores populacionais conforme asseguram os resultados dos quadros (Q.IV.6) e (Q.IV.7). A seguir, na figura F.V.1, é mostrada uma representação gráfica da variação em relação aos valores populacionais, das previsões das cheias referentes aos períodos de retorno de 50, 100 e 1000 anos, para os arquivos dos três casos estudados.

Portanto, considerando que o processo de análise da frequência das cheias não fornece resultados satisfatórios quando se tem registros fluviométricos de curta duração, e que por outro lado a confiabilidade na previsão de cheias associadas a grandes tempos de recorrência aumenta substancialmente (BENSON⁵, VICTOROV⁶²) quando cresce o comprimento dos registros, podemos concluir que a extensão dos mesmos através do uso de modelos matemáticos do tipo "chuva-vazão", a partir do momento em que tenha sido assegurada uma boa calibração dos seus parâmetros às características da bacia hidrográfica, é uma técnica bastante recomendável, como demonstram os resultados obtidos neste trabalho.

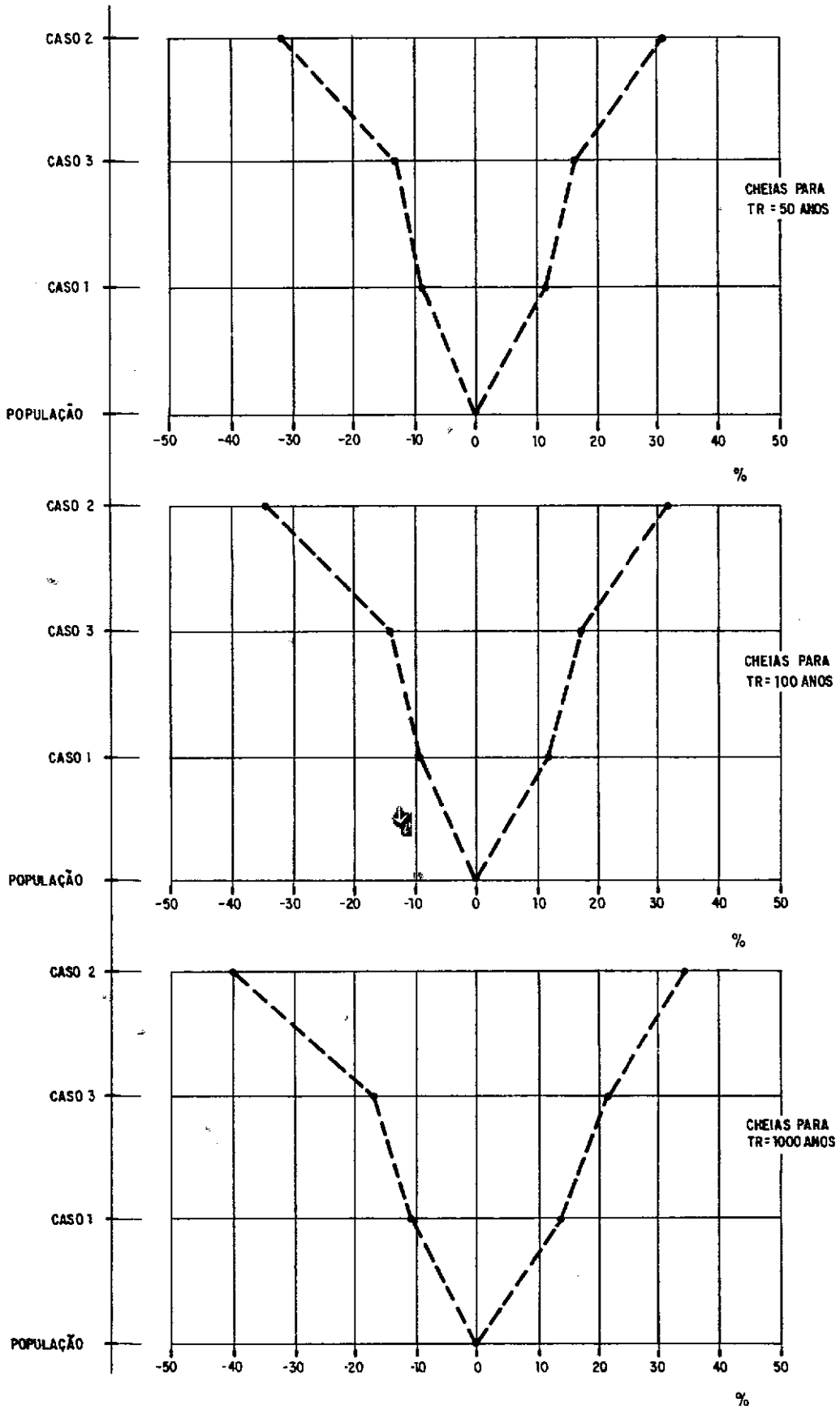
V.2- RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Quanto a geração de chuvas diárias, o modelo selecionado (KELMAN³²) possui uma potencialidade de aplicação mais ampla do que a utilizada. Seu equacionamento matemático permite a geração de precipitação para várias estações, e não apenas para um único posto como a realizada. Portanto, é um modelo que pode ser adotado em vários estudos hidrológicos.

Os modelos matemáticos determinísticos do tipo "chuva-vazão" são objeto de constante pesquisa e aplicações práticas. Recomendar uma maior investigação na formulação teórica dos mesmos é desnecessário, entretanto, existem pelo menos dois aspectos quanto a calibração dos seus parâmetros que merecem pesquisas mais cuidadosas.

O primeiro refere-se a função objetivo a ser utilizada, objeto de rápida análise neste trabalho, principalmente em função dos resultados de CANEDO¹⁰. Contudo, mesmo selecionando-se para a calibração a única função, comprovada matematicamente

FIGURA F.V.1 - VARIAÇÕES DAS PREVISÕES DAS CHEIAS
EM RELAÇÃO AOS VALORES DA POPULAÇÃO



(CANEDO¹⁰), que enfatiza as vazões altas, houve a necessidade de uma premissa simplificadora tal como a adoção de um patamar para as vazões, para a obtenção de um melhor ajuste dos valores extremos.

Portanto, embora provado((CANEDO^{10,11}) que a escolha da função objetivo não seja um processo subjetivo, julga-se importante aplicações práticas em maior número com as mesmas, em problemas reais bem definidos, para possibilitar a confirmação da validade da adoção das expressões matemáticas disponíveis na literatura.

O segundo aspecto é o processo de calibração dos parâmetros através da utilização de rotinas automáticas, como o método de ROSENBROCK adotado no modelo determinístico utilizado. Embora o ajuste matemático seja mais indicado que o método da "tentativa e erro", o mesmo possui agregado um enorme custo computacional, como foi verificado no desenvolvimento deste trabalho.

O ajuste dos parâmetros do modelo a cada grupo de 5 anos de registros diários, referentes aos 30 arquivos de descargas "observadas", procedeu-se por minimização da função objetivo para um máximo de 1200 iterações do modelo. O tempo médio necessário foi de 76 minutos de unidade central de processamento para cada um dos programas, em um computador IBM 4341, com Sistema Operacional OS/MVS e compilador FORTRAN G.

Uma primeira sugestão para a redução dos custos seria a de limitar o total máximo de iterações do processo de calibração, dado que os resultados demonstraram a utilização de um excessivo número de iterações do modelo para o ajuste "fino" dos seus parâmetros. Além disso, verificou-se a existência de uma linearidade, aproximada, entre o tempo de processamento e o total de cálculos da função objetivo, descontados os gastos com a leitura das variáveis de entrada e impressão dos resultados do programa.

Consequentemente, se as calibrações fossem efetuadas para um total de, por exemplo, 500 cálculos da função objetivo

ao invés de 1200 como estabelecido, haveria uma redução significativa dos custos totais do trabalho.

Deve ser ressaltado, contudo, que só foi possível uma maior rapidez no ajuste dos parâmetros do modelo, após a redução de amplitude total de variação permitida para os mesmos. Inicialmente, a faixa permitida para os seus valores era bastante ampla, em razão de estar-se trabalhando com uma bacia hidrográfica resultante dos valores fornecidos aos parâmetros do SWM-IV.

Logo, uma segunda sugestão para a redução dos custos referentes a fase de calibração do modelo à uma bacia hidrográfica, seria a de procurar-se quantificar, a priori da execução do programa, possíveis faixas de variação dos seus parâmetros. No caso de estudos em bacias reais isto sempre é possível, pois a maioria dos parâmetros acham-se relacionados às várias características próprias da bacia, como por exemplo, declividade média, tipo de solo e vegetação, comprimento médio de escoamento superficial, etc.

APÊNDICEDESCRIÇÃO DOS MÉTODOSMÉTODO DOS MOMENTOS (KITE³³)

Este método utiliza a seguinte equação geral para cálculo do "R-ésimo" momento em relação a origem de uma distribuição contínua de probabilidades, $p(x)$:

$$\mu'_R = \int_{-\infty}^{+\infty} x^R p(x) dx \quad (A.1)$$

Tal equação referenciada ao momento central da distribuição será escrita como:

$$\mu_R = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu'_1)^R p(x) dx \quad (A.2)$$

onde μ'_1 é o primeiro momento em relação a origem.

O método dos momentos relaciona os momentos obtidos na amostra aos respectivos momentos da distribuição.

MÉTODO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA (KITE³³)

O método está baseado no princípio da máxima verossimilhança, o qual enuncia que para uma distribuição cuja função de densidade de probabilidades seja da forma $p(x; \alpha, \beta, \dots)$, onde α, β, \dots são os parâmetros da distribuição a serem estimados. Então, a probabilidade de ser obtido um determinado valor de X , por exemplo X_i , é proporcional a $p(X_i; \alpha, \beta, \dots)$; e a probabilidade conjunta, L , de ser obtida uma amostra de "n" valores, (X_1, X_2, \dots, X_n) é proporcional ao produto:

$$L = \prod_{i=1}^n p(X_i; \alpha, \beta, \dots) \quad (A.3)$$

onde L é a denominada função de verossimilhança.

O método de máxima verossimilhança consiste em estimar α, β, \dots de tal forma que a função L seja maximizada. Tal otimização é obtida pela diferenciação parcial da função L em relação a cada um dos parâmetros, separadamente, e igualando-se tais resultados a zero.

Frequentemente, para a simplificação dos cálculos é adotada a função L na sua forma logarítmica natural, ou seja, $\ln L$.

EXEMPLO: Aplicação dos Métodos-Distribuição Normal

A distribuição Normal possui dois parâmetros que serão simbolizados por α e β , neste exemplo.

A) Método dos Momentos

Sendo a função de densidade, $p(x)$, neste caso escrita por:

$$p(x) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2} \quad (A.4)$$

$$\text{Logo: } \mu'_R = \int_{-\infty}^{+\infty} x^R \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (A.5)$$

Para o primeiro momento em relação a origem temos:

$$\mu'_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x}{\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (A.6)$$

Substituindo $\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)$ por z , $dx = \beta dz$, então:

$$\mu'_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (z\beta + \alpha) e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (A.7)$$

Contudo, $ze^{-z^2/2}$ é uma função ímpar e, por definição, a integral deste tipo de função entre limites simétricos é zero, logo:

$$\mu'_1 = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2/2} dz = \alpha \quad (A.8)$$

Ou seja, o parâmetro α é a média aritmética do universo (o momento de primeira ordem em relação a origem), cujo correspondente na amostra é \bar{X} .

Para o momento central de segunda ordem:

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (A.9)$$

Porém, como $\alpha = \bar{x}$ e substituindo $\left(\frac{x-\bar{x}}{\beta}\right)$ por z , onde $dx = \beta dz$, tem-se:

$$\mu_2 = \frac{\beta^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} z^2 e^{-z^2/2} dz \quad (A.10)$$

Sendo $z^2 e^{-z^2/2}$ uma função par, e substituindo $\frac{z^2}{2}$ por y tem-se:

$$\mu_2 = \frac{2\sqrt{2}\beta^2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} y^{\frac{1}{2}} e^{-y} dy \quad (A.11)$$

$$\mu_2 = \frac{2\beta^2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \beta^2$$

Ou seja, β é a raiz quadrada do segundo momento central, o desvio padrão da amostra.

B) Método da Máxima Verossimilhança

$$\text{Sendo } p(x) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2} \quad (\text{A.12})$$

A função de verossimilhança é:

$$L = \left[\frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \right]^n \cdot e^{-\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \alpha)^2}{2\beta^2}} \quad (\text{A.13})$$

E o seu logaritmo será de forma:

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln 2\pi - \frac{n}{2} \ln \beta^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \alpha)^2}{2\beta^2} \quad (\text{A.14})$$

Diferenciando em relação aos parâmetros α e β^2 , e igualando a zero, surge:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \alpha)}{\beta^2} = 0 \quad (\text{A.15})$$

$$\sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \alpha = 0$$

como $\sum_{i=1}^n \alpha = n\alpha$

Logo $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}$, a média aritmética da distribuição

Também
$$\frac{\partial \text{Ln} L}{\partial \beta^2} = \frac{-n}{2\beta^2} + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \alpha)^2}{2\beta^4} = 0$$

(A.16)

$$\beta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

donde β é o desvio padrão da distribuição

Para as várias distribuições usualmente adotadas na análise da frequência das cheias, a estimação dos seus parâmetros segue procedimento análogo ao do exemplo a partir de suas respectivas funções de densidade de probabilidade, como pode ser visto em KITE³³ e outros trabalhos na literatura.

BIBLIOGRAFIA

- * 1. ADAMOWSKI, K. & SMITH, A.F. - Stochastic Generation of Rainfall. J. Hydraulics Div., ASCE, 98 (HY11): 1935-1944, 1972.
- + 2. AITKEN, A.P. - Assessing Systematic Errors in Rainfall-Runoff Models. J. of Hydrology, 20: 121 - 136, 1973.
- * 3. ANDERSON, J.A. - Computer Application to System Analysis - Lower Mekong River. U.S. Army Engineer Div., North Pacific, Portland, Oregon, 1967.
- * 4. BEARD, L.R. - Optimization Techniques for Hidrologic Engineering. Water Resources Research, 3(3): 807 - 815, 1967.
- + 5. BENSON, M.A. - Characteristics of Frequency Curves Based on a Theoretical 1000-year Record. Water Supply Paper, 1543-A, U.S. Geological Survey Open File Report, 1960.
- + 6. BENSON, M.A. - Plotting Positions and Economics of Engineering Planning - J. Hydraulics Div., ASCE, 88(HY6): 57 - 71, 1962.
- + 7. BENSON, M.A. - Uniform Flood Frequency Estimating Methods for Federal Agencies. Water Resources Research, 4(5): 891-908, 1968.
- + 8. BOUGHTON, W.C. - Flood Estimation from Short Records. J. Hydraulics Div., ASCE, 102 (HY3): 241 - 253, 1976.
- + 9. BRAGA JR., B.P.F. - Stanford Watershed Model IV: um Modelo de Simulação do Ciclo Hidrológico. Seminário de Recursos Hídricos, EPUSP, São Paulo, 1974.
- +10. CANEDO, P. - The Reliability of Conceptual Catchment Model Calibration. Ph.D. Thesis, University of Lancaster, U.K., 1979.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- +11. CANEDO, P. - Calibração de um Modelo de Previsão de Cheias. Rev. Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, 2(2): 133 - 138, 1980.
- *12. CLARKE, R.T. - Mathematical Models in Hydrology. Irrigation and Drainage, FAO-UNO, 19, Rome, 1973.
- +13. CRAWFORD, N.H. & LINSLEY, R.K. - The Synthesis of Continuous Streamflow Hydrographs on a Digital Computer. Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Tech. Report 12, 1962.
- +14. CRAWFORD, N.H. & LINSLEY, R.K. - Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Tech. Report 39, 1966.
- *15. DAS, S.C. - The Fitting of Truncated Type III Curves to Daily Rainfall Data. Australian Journal of Physics, 7: 298-304, 1955.
- +16. DAWDY, D.R. & O'DONNELL, T. - Mathematical Models of a Catchment Behavior. J. Hydraulics Div., ASCE, 91 (HY4): 123-137, 1965.
- +17. DAWDY, D.R. & BERGMAN, J.M. - Effect of Rainfall Variability on Streamflow Simulation. Water Resources Research, 5 (5): 958-966, 1969.
- *18. FLEMING, G. - Computer Simulation Techniques in Hydrology. Elsevier, New York, 1975.
- *19. FLETCHER, R. & POWELL, M.J.D. - A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization. The Computer Journal, 6: 163-168.
- *20. FRANZ, D.D. - Hourly Rainfall Generation for a Network. Proc. Symposium on Statistical Hydrology, Tucson, Arizona, 1971. U.S.D.A. Misc. Publication, 1275: 147-153, 1974.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- *21. FULLER, W.E. - Flood Flows. ASCE, 77: 564-617, 1914.
- *22. GABRIEL, K.R. & NEUMANN, J. - A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrence at Tel Aviv. Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 88: 90-95, 1962.
- *23. GRACE, R.A. & EAGLESON, P.S. - The Synthesis of Short Time Increment Rainfall Sequences. RALPH M. PARSONS Laboratory Report, MIT. 91, Massachusetts, 1966.
- *24. GUMBEL, E.J. - Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications. Applied Math., U.S. National Bureau of Standards, 33, 1954.
- *25. HOLTAN, H.N. - Hydrologic Research for Watershed Engineering. J. of Hydrology, 8: 207-216, 1969.
- *26. HORTON, R.E. - Discussion on Distribution of Intense Rainfall. ASCE, 87: 578-585, 1924.
- *27. IBBITT, R.P. - Systematic Parameter Fitting for Conceptual Models of Catchment Hydrology. Ph.D. Thesis, IMPERIAL COLLEGE, University of LONDON, U.K., 1970.
- +28. IBBITT, R.P. & O'DONNELL, T. - Fitting Methods for Conceptual Catchment Models. J. Hydraulic Div., ASCE, 97 (HY9): 1331-1342, 1971.
- +29. IBBITT, R.P. & O'DONNELL, T. - Designing Conceptual Catchment Models for Automatic fitting Methods. Proc. of Warsaw Symposium, 1971. Math. Models in Hydrology, IAHS, 101: 461-475, 1974.
- *30. KARNOPP, D.C. - Search Theory Applied to Parameter Scan Optimization Problems. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1961.
- *31. KARNOPP, D.C. - Random Search Technique for Optimization Problems. Automatica Pergamon Press, 1: 111-121, 1963.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- +32. KELMAN, J. - Stochastic Modeling of Hidrologic Intermittent Daily Processes. Hydrology Papers. Colorado State Univ., 89, Fort Collins, Colorado, 1977.
- +33. KITE, G.W. - Frequency and Risk Analysies in Hydrology. Water Resources Publications, 2nd Edition, Fort Collins, Colorado, 1978.
- *34. KRAEGER, B.A. - Stochastic Monthly Streamflow by Multistation Daily Rainfall Generation. Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Tech. Report 152, 1971.
- *35. LEVENBERG, K. - A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. Quaterly of Applied Mathematics, 2: 164-168, 1944.
- +36. LINSLEY, R.K. & FRANZINI, J.B. - Water Resources Engineering. Mc.Graw - Hill, KOGAKUSHA, 2nd Edition, 1972.
- *37. LIOU, E.Y. - OPSET; Program for Computerized Selection of Watershed Parameter Values for SWM IV. W.R.I. Report, Univ. of Kentucky, 34, 1970.
- +38. LOTUFO, J.G.C. - Análise, Geração e Desagregação de Precipitações Diárias. Boletim Técnico DAEE, 3(2): 81-224, São Paulo, 1980.
- *39. MARQUARDT, D.W. - An Algorithm for Least Square Estimation of Nonlinear Parameters. J.Soc.for Industrial and Applied Mathematics, 11(2): 431-441, 1963.
- *40. McCONALOGUE, D.J. - Privative Communication to O'Donnell , 1966.
- *41. MERO, F. - Second Progress Report on Preparation of Hidrological Data for Flood Control Unit. Tahal Consulting Eng., Iran Branch, Ghazuin, 1971.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- *42. NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. - River Flow Forecasting Through Conceptual Models; Part I-A-Discussion of Principles. J.of Hydrology, 10: 282-290, 1970.
- +43. NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL - Flood Studies Report. London, 1975.
- *44. NICKS, A.D. - Stochastic Generation of the Occurrence Pattern, and Location of Maximum Amount of Daily Rainfall. Proc. Symposium on Statiscal Hydrology, Tucson, Arizona, 1971. H.S.D.A. Misc. Publication, 1275: 154-171, 1974.
- +45. NOWACKI, H. - Optimization Methods. Marine Systems Technical Memorandum, B.S.R.A., T.M.40, 1971.
- +46. O'DONNELL, T. & CANEDO, P. - The Reliability of Conceptual Basin Model Calibration. Proc. of Oxford Symposium, 1980. Hydrological Forecasting, IAHS, 129, 1980.
- *47. PATTISON, A. - Synthesis of Hourly Rainfall Data. Water Resouces Research, 1(4): 489-498, 1965.
- *48. PITMAN, W.V. - Flow Generation by Catchment Models of Differing Complexity: A Comparison of Performance. Hydrological Research Unit, Univ. of Witwatersrand Johannesburg, Tech. Report 1, 1977.
- *49. POWELL, M.J.D. - An Efficiente Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives. The Computer Journal, 7: 155-162, 1964.
- *50. POWELL, M.J.D. - A Method for Minimizing a Sun of Square of Non-Linear Functions without Calculating Derivatives. The Computer Journal, 7: 303-307, 1965.
- +51. REICH, B.M. - Log Person Type III and Gumbel Analysis of Floods. Proc. Second International Symposium in Hydrology, Floods and Droughts, Fort Collins, Colorado, 1973.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- *52. RICCA, V.T. - The Ohio State University Streamflow Simulation Model. Water Resources Center, Tech. Report B.005/019, 1974.
- +53. RONDON, D.J.S. - Hidrotécnica I, Hidrologia, Reservatório de Estiagem. Escola de Engenharia, UFRJ, 1977.
- +54. ROSENBROCK, H.H. - An Automatic Method for finding the Greatest or Least Value of a Function. The Computer Journal, 3: 175-184, 1960.
- *55. SCHAAKE, et al - Multivariate Rainfall Generator for Anual, Seasonal, Monthly and Daily Events. Proc. International Symposium on Mathematical Modelling Techniques in Water Resources Systems, OTAWA, 1972.
- *56. SINGH, K.P. - Theoretical Baseflow Curves. J. Hydraulics Div., ASCE, 95 (HY6): 2029-2048, 1969.
- *57. TODOROVIC, P. & YEVJEVICH, V. - Stochastic Process of Precipitation. Hydrology Papers, Colorado State Univ., 35, Fort Collins, Colorado, 1969.
- *58. TODOROVIC, P. & WOOLHISER, D.A. - Stochastic Model of Daily Rainfall. Proc. Symposium on Statistical Hydrology, Tucson, Arizona, 1971. U.S.D.A. Misc. Publication, 1275:232-246, 1974.
- +59. U.S. WATER RESOURCES COUNCIL - A Uniform Technique for Determining Flood Flow Frequencies. Bulletin nº 15, 1967.
- +60. U.S. WATER RESOURCES COUNCIL - Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin, nº 17A, Revised, 1977.
- *61. VERSCHURENT, J.P. - A Stochastic Analysis of Precipitation. Ph.D. Thesis, Colorado State University, Fort. Collins, Colorado, 1968.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada

- + 62. VICTOROV, P. - Effect of Period of Record on Flood Prediction,
J.Hidraulics Div., ASCE, 97 (HY11): 1853 - 1866, 1971.
- + 63. VIESSMAN, W.Jr. & HARBAUGH, T.E. & Knapp, J.W. - Introduction
to Hydrology, London, 1972.
- * 64. WALES, J.L. - Nonlinear Estimation of Parameters. Imperial
Chemical Industries LTd., Central Instrument Research
Laboratory, Report A15.
- * 65. WALLIS, J.R. - Risk and Uncertainties in the Evaluation of
Flood Events for the Design of Hydrologic Structures.
Seminar on Extreme Hydrological Events, 'Floods' and
Droughts, Erice, Italy, 1980.
- * 66. WHIPPLE, W. - Regional Drought Frequency Analysis. J.Irrigation
and Drainage Div., ASCE, IR2: 11 - 31, 1966.
- + 67. YEVJEVICH, V. - Structural Analysis of Hydrologic Times
Series. Hydrology Papers, Colorado State Univ., 56, Fort
Collins, Colorado, 1972.
- * 68. ZANGWILL, W.I. - Minimizing a Function without Calculating
Derivatives. The Computer Journal, 10: 293 - 296, 1967.

+ Referências bibliográficas

* Bibliografia adicional recomendada